CRÉATION D'UN ENVIRONNEMENT POUR LE DÉVELOPPEMENT DE PROJET EN ÉLECTROTECHNIQUE

Code de diffusion: 1532-0233

1987-1988

Jean Rouillard

Collège Lionel-Groulx

90-04345/

Cette recherche a été subventionnée par la Direction générale de l'enseignement collégial dans le cadre du Programme d'aide à la recherche sur l'enseignement et l'apprentissage.

La page couverture est une réalisation de Annie Ducharme

On peut obtenir des exemplaires supplémentaires de ce rapport de recherche auprès de la Direction des services pédagogiques du collège Lionel- Groulx, 100 Duquet, Ste-Thérèse, J7E 3G6, (514)430-3120.

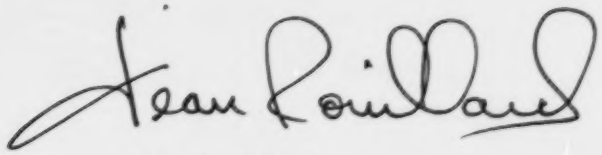
Dépôt légal - premier trimestre 1989
Bibliothèque nationale du Québec
I.S.B.N. 2-920900-12-9

PRÉFACE

Ce document est l'aboutissement de plusieurs années de travail. Depuis le début de mon enseignement, je cherche des outils de travail qui me permettraient de faciliter l'apprentissage tout en respectant la réalité industrielle et ses problèmes. La motivation me vient de collègues de travail comme Alberto De Sousa et Guy Tessier qui m'ont appuyé par la réalisation de logiciels que je n'aurais pas pu créer dans des délais raisonnables et de Jean Cayer, notre technicien, qui ne peut jamais rien nous refuser. Je voudrais profiter de l'occasion pour souligner leur travail en coulisse qui m'a permis de développer pour vous certaines choses concrètes qui pourront vous être utiles.

J'aimerais aussi remercier Monsieur Robert Quesnel, responsable de la recherche au Collège Lionel-Groulx, pour sa patience et sa compréhension ainsi que Francine Debien, sa secrétaire, pour tous les petits travaux de dernière minute. Je ne voudrais pas oublier les deux personnes qui ont permis que ce travail soit un chef-d'oeuvre littéraire soit: Chantal Pétrin pour son travail minutieux sur traitement de texte et Lorraine Rousseau pour le travail de correction du français (me connaissant ce n'était sûrement pas une partie de plaisir).

Je désire, en terminant, remercier le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Technologie ainsi que le Collège Lionel-Groulx pour leur collaboration monétaire nécessaire à la réalisation d'un tel travail.



Jean Rouillard
Professeur d'électrotechnique

TABLE DES MATIERES

PRÉFACE..... iii

TABLE DES MATIERES..... v

LISTE DES FIGURES..... ix

INTRODUCTION..... 1

PARTIE A - UNE DÉMARCHE SUGGÉRÉE POUR LA RÉALISATION D'UN PROJET EN ÉLECTROTECHNIQUE

Introduction..... 4

1.0 Choix du projet..... 5

1.1 Détermination du projet..... 6

1.2 Situation physique du système..... 7

1.3 Genre d'utilisateur..... 9

1.4 Sécurité.....10

1.5 Définition des entrées et sorties.....11

1.6 Dimensions.....15

1.7 Coûts matériels du prototype.....16

1.8 Standardisation.....18

2.0 Croquis du système.....21

3.0 Utilisation de logiciels D.A.O.....25

4.0 Les systèmes d'essais.....29

4.1 L'émulateur ROM.....32

4.2 L'analyseur d'état logique.....32

4.3 L'oscilloscope.....33

5.0 Fabrication du Artwork.....35

6.0 Montage du prototype.....39

7.0 La production et les tests.....41

PARTIE B - LE CIRCUIT IMPRIMÉ

Section I - La fabrication des circuits imprimés

Introduction.....47

1.0 Qu'est-ce qu'un circuit imprimé?.....49

2.0 Types de circuits imprimés.....51

3.0 Pourquoi enseigner la fabrication des circuits imprimés?.....53

4.0 La fabrication de circuits imprimés.....55

4.1 La lamination du cuivre.....55

4.2 L'exposition.....55

4.3 Le développement.....60

4.4 La gravure.....63

Section II - Réalisation de circuits imprimés avec métallisation des trous

Introduction.....69

1.0 Réalisation du laboratoire.....75

2.0 Le procédé.....79

2.1 Préparation de la plaque.....79

2.2 Perçage de la plaque.....79

2.3 Plaquage de la plaque avec du cuivre.....80

3.0 Lamination et exposition.....85

4.0 Électroplaquage: cuivre et plomb/étain.....89

5.0 La gravure.....91

6.0 "Silkscreen" et "Solder mask".....93

6.1 Préparation de la soie.....93

6.2 Impression de la plaque.....95

7.0 L'entretien du système.....99

7.1 Les produits chimiques.....99

7.2 Quelques conseils pratiques.....106

8.0 Plaquage des connecteurs.....111

CONCLUSION.....115

BIBLIOGRAPHIE.....119

ANNEXE I.....121

LEXIQUE.....125

QUESTIONNAIRE.....133

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Blindage d'un conducteur.....12

Figure 2 : Utilisation d'un câble plat.....12

Figure 3 : Représentation électrique d'un câble plat...13

Figure 4 : Esquisse d'un système de mesure de la vitesse.....21

Figure 5 : Schéma bloc du système à concevoir.....22

Figure 6 : Schématique du système de mesure de la vitesse.....28

Figure 7 : Constitution du film photosensible.....58

Figure 8 : Développement du film photosensible.....62

Figure 9 : Courbe de comparaison des produits chimiques utilisés pour le "Etching".....63

Figure 10: Étude du problème de la gravure latérale....65

Figure 11: Exemple d'aménagement d'un laboratoire de fabrication de circuits imprimés.....76

INTRODUCTION

Ce document renferme beaucoup d'informations techniques. Il s'adresse donc à un lecteur averti qui possède de bonnes connaissances en électronique. Si vous ne correspondez pas au portrait type, certains passages risquent d'être passablement nébuleux pour un néophyte.

Ce travail comprend deux parties distinctes. La première présente la démarche que l'on doit suivre lors de la réalisation d'un projet. Elle identifie les étapes importantes tout en illustrant certains procédés que j'ai expérimentés. Pour bien visualiser le concept, je vous propose un cas concret qui consiste à réaliser un produit pour une compagnie fictive que nous appellerons "ABC inc.". Le but de cette stratégie sera d'appliquer chaque étape de notre projet à une situation réelle.

La deuxième partie est consacrée exclusivement à la fabrication de circuits imprimés. Pourquoi? Tout simplement parce que la concrétisation d'un projet serait impossible sans cette étape. Ce serait comme faire les plans d'une maison sans jamais la bâtir. De plus, la fabrication de circuits imprimés en éducation, n'est pas une technologie bien documentée et est souvent utilisée avec des méthodes et des équipements plutôt artisanaux. Comme j'ai pu expérimenter sur le sujet, je crois qu'il est essentiel d'inclure dans cette recherche cette information. Dans cette deuxième partie, une section entière traite des différents éléments qui composent

cette nouvelle technologie. Dans l'autre section, vous trouverez, sous forme d'un manuel d'utilisation, la méthode utilisée pour la fabrication de circuits imprimés avec métallisation des trous. Nous avons réalisé à notre collège ce laboratoire et nous avons cru bon d'identifier en détail l'emplacement, l'aménagement, l'organisation et les composantes de notre système. Bien entendu, il s'agit d'un système avec un type d'équipement bien précis. Le but de cet excès de détails est de vous familiariser avec ce procédé afin que vous puissiez avoir une idée de ce qu'implique l'installation et l'opération d'un tel laboratoire. Un dernier objectif, mais non moins important, est de vous sensibiliser et de vous donner le goût de vous impliquer dans cette nouvelle technologie.

Dans le but de bien suivre notre démarche, nous avons inclus un petit lexique qui vous permettra de mieux comprendre le sens de certains mots techniques inclus dans le présent rapport. Finalement pour bien vérifier votre compréhension nous vous suggérons de répondre au questionnaire à la fin du document. Vous trouverez les réponses aux pages suggérées au bas de chaque question.

J'espère donc que ce document suscitera beaucoup d'intérêt et n'hésitez pas à me contacter pour des questions ou pour me faire part de vos commentaires.

PARTIE A

UNE DÉMARCHE SUGGÉRÉE POUR LA RÉALISATION D'UN PROJET EN ÉLECTRONIQUE

INTRODUCTION

Dans ce document, nous n'avons pas l'audace de croire que la démarche proposée est la meilleure. Elle a seulement le mérite d'avoir été expérimentée pendant quelques années. Cette recherche nous a permis de rassembler certains éléments qui jusqu'à maintenant étaient plutôt dispersés.

A l'intérieur du présent document, vous trouverez les éléments de base pour la réalisation d'un projet. Nous utiliserons un exemple que nous garderons tout au long du projet d'expérimentation. Dans la démarche proposée, nous regarderons tous les aspects du projet tels que le choix (besoin) du projet, la stratégie, le choix des composantes, les essais, le prototype, les essais pré-production et même la production.

Ce document ne contient pas de détail sur l'utilisation des outils car l'évolution étant très rapide nous avons constaté qu'il serait malhabile de tenter de formuler une explication avec du matériel qui change continuellement. (Ex: Le logiciel Orcad a subi quatre modifications pendant la durée de la recherche). Voici donc maintenant ce que la Compagnie ABC inc. nous demande de réaliser.

1.0 Choix du projet

On ne décide pas un beau matin de faire un projet quelconque. Notre choix est toujours motivé par un besoin bien précis.

Ce besoin est, la plupart du temps, basé sur une raison monétaire directe ou indirecte. Directe dans le cas où le circuit rapportera au niveau de la vente et indirecte lorsque le circuit servira à améliorer l'efficacité d'un procédé déjà existant. Pour mieux comprendre toutes les étapes à suivre pour la réalisation d'un projet spécifique, nous utiliserons une compagnie imaginaire. Ici, la Compagnie ABC inc. nous demande de réaliser un système nous permettant de mesurer la vitesse d'un projectile soit, une balle de carabine. Il s'agit dans ce cas-ci d'un produit destiné à la vente.

Il faut à ce moment précis poser quelques questions afin de bien cerner la problématique. Les points à vérifier dans un premier temps sont:

- Est-ce un produit qui sera portatif (fonctionne à piles ou avec le secteur)?
- Utilisation à l'extérieur ou à l'intérieur (choix du type de boîtier)?
- Si extérieur, temps de l'année et endroit. (Il faut déterminer les marges de température d'opération)?

- Type d'utilisateur. (L'utilisateur est-il un spécialiste ou monsieur tout le monde?)

1.1 Détermination du type de système

Nous devons d'abord établir quel type d'appareillage nous aurons à concevoir. Si le système est portatif, nous devrons surveiller le poids et les dimensions de l'appareil. De plus, nous aurons à utiliser des piles ce qui nous amènera à employer des composantes à faible consommation comme la technologie "CMOS". Le système étant portatif, pourra être manipulé, ce qui en fera un système sensible à des bris d'ordre mécanique. Nous devrons voir à ce que les composantes mobiles soient de bonne qualité. Si le système est fixe, nous orienterons nos énergies sur l'aspect esthétique. Quoi qu'on en pense, il s'agit ici d'un facteur très important, car le client susceptible d'acheter votre produit et qui se trouve face à deux produits possédant les mêmes fonctions fera son choix en fonction de l'esthétique. Vous devrez donc considérer l'allure de votre produit comme une qualité supplémentaire. Il faudra informer votre client qu'un système portatif est souvent plus cher à concevoir à cause du nombre de contraintes auxquelles on doit faire face. Donc en résumé:

PORTATIF	FIXE
- Léger + complet - Fonctionne à piles - Versatile - Assez cher - Autonomie restreinte	- Plus robuste - Fonctionne sur le secteur - Coût intéressant - Autonomie limitée due à sa grosseur et sa source énergétique

1.2 Situation physique du système

Que le système soit fixe ou portatif, nous devrons envisager la possibilité d'utiliser un tel système à l'intérieur ou à l'extérieur. On pourrait croire qu'un système placé à l'abri des intempéries est nécessairement protégé contre les ennuis possibles. Mais il arrive quelquefois qu'un système à l'intérieur doit être isolé de la poussière, de l'humidité ou autres corps étrangers pouvant nuire à son bon fonctionnement. L'interaction avec un opérateur travaillant avec de l'huile ou autres saletés nous amène à choisir des interrupteurs hermétiques afin de limiter la présence de saletés dans les composantes mécaniques. On choisira aussi un matériel lavable pour le boîtier. S'il y a des connecteurs non permanents, on devra utiliser un petit rabat pour venir fermer l'obturation. Si le système doit se situer à l'extérieur, on devra obligatoirement le rendre étanche. Un système pourra être partiellement à l'extérieur, c'est-à-dire seulement par beau temps. Si le système doit être à l'extérieur à plein temps, nous devrons vérifier

les écarts de température qu'il devra subir. Certaines normes nous permettent de catégoriser trois types de technologie.

1) **Commerciale de 0°C à 75°C.** Utilisée dans les conditions normales de température (une saison: été).

2) **Automotive de -40°C à +85°C.** Utilisée souvent en électronique automobile ou lorsque le système est partiellement protégé du froid (trois saisons: printemps, été, automne).

3) **Militaire de -55°C à + 125°C.** Comme son nom l'indique, cette technologie a été créée pour l'utilisation militaire. On l'emploie dans des conditions de température extrême. Elle peut être utilisée en plein hiver sans problème.

Le choix de la technologie pourrait être très simple, on pourrait utiliser uniquement des composantes de technologie militaire et plus de problème. Sauf que l'on paie pour ce qu'on a. Par exemple, un circuit intégré coûte $3.95 en technologie commerciale, environ $10.00 en technologie automotive et $75.00 en construction militaire. Le problème doit se poser très sérieusement. Le milieu est très important même à l'extérieur. Si on installe un système destiné à fonctionner au bord de la mer, nous devrons tenir compte de la conductibilité de l'eau salée et de sa corrosivité.

On remarque ici que l'endroit et les conditions d'opération doivent être définis de façon très précise car à cette étape, on ne décide pas des composantes mais de la technologie à utiliser.

1.3 Genre d'utilisateur

Lorsque l'on conçoit un système, on voudrait avoir le plus de versatilité possible. Mais on oublie souvent que l'utilisateur et le concepteur sont rarement la même personne. Voici peut être la partie la plus difficile pour le technicien. Un bon concepteur saura tenir compte des aptitudes de l'utilisateur. Ce dernier devra être identifié le plus clairement possible.

Pour parer à ce problème, nous devons connaître à quel niveau technologique se situe notre utilisateur et simuler toutes les manipulations pouvant être effectuées par ce dernier.

Dans la plupart des cas, il est préférable d'avoir des fonctions bien précises, mais il peut arriver que la mise en place de système plus complexe nécessite la présence d'une main-d'oeuvre plus qualifiée. Vous devrez aussi à ce niveau définir le type de "feedback" à donner à l'utilisateur. (Utilisation d'affichage, de témoin lumineux ou sonore).

1.4 Sécurité

Il peut paraître étrange de parler sécurité mais on verra quelle est son implication dans la réalisation d'un projet.

D'abord, n'oublions pas que si l'équipement doit être alimenté sur le secteur, il devra obtenir l'approbation CSA (Canadian Standard Association) au Canada et UL (Underwriter Laboratories) aux États-Unis. Si on utilise des composantes déjà reconnues, les délais seront assez courts, mais dans l'inverse, il faut s'armer de patience car on s'acharnera à essayer de trouver des défauts (sécurité) à votre prototype. L'utilisation d'alimentation déjà approuvée, comme les adapteurs avec prises pour radio, ne nécessite pas cette dernière démarche.

S'il arrive que votre système soit utilisé dans un environnement où se trouvent des matières explosives ou que ce dernier soit destiné à des fonctions bio-médicales, il est alors préférable de communiquer avec les sociétés d'approbation afin de connaître les restrictions précises pour votre application. Il est possible, sur demande, d'obtenir la description écrite des standards sur certains équipements déjà existants.

1.5 Définition des entrées et sorties

Le technicien a aussi la tâche de déterminer avec le client les différentes entrées et sorties à installer. Qu'il s'agisse d'un clavier, d'un affichage ou encore de l'interface à installer entre le système et un appareil déjà existant, on doit bien identifier le type d'interaction qui servira de communication entre l'usager et son système. Par exemple, on choisira un éclairage à D.E.L.[1] si l'éclairage ambiant est inadéquat ou encore si la lecture doit se faire à une plus grande distance. Par contre, l'utilisation de piles nous obligera à utiliser un affichage à cristaux liquides. Il en va de même pour les claviers, un choix devra être fait en fonction de l'environnement de notre système.

S'il arrive que l'on doive relier notre système à un autre et que cela nécessite l'utilisation d'un câble, on devra alors tenir compte de certains critères qui permettront la transmission des signaux le plus fidèlement possible. Dans le cas de signaux faibles, on fera des câbles courts et munis d'un blindage (voir figure 1).

---

1 Diodes émettrices de lumière.

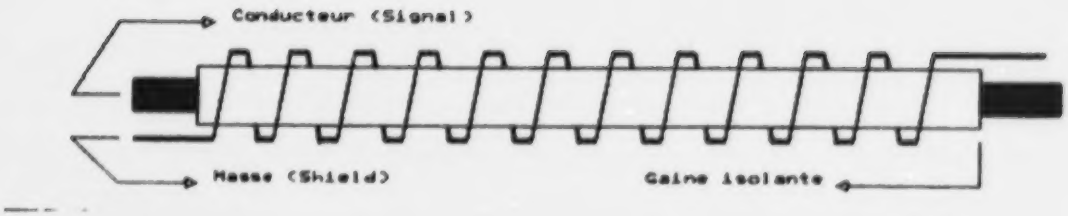


Fig. 1: Blindage d'un conducteur

S'il s'agit d'information numérique (en commutation) à haute vitesse et que l'on doit utiliser des câbles plats (ribbon cables), on verra à placer un fil de masse entre deux signaux (fig. 2).

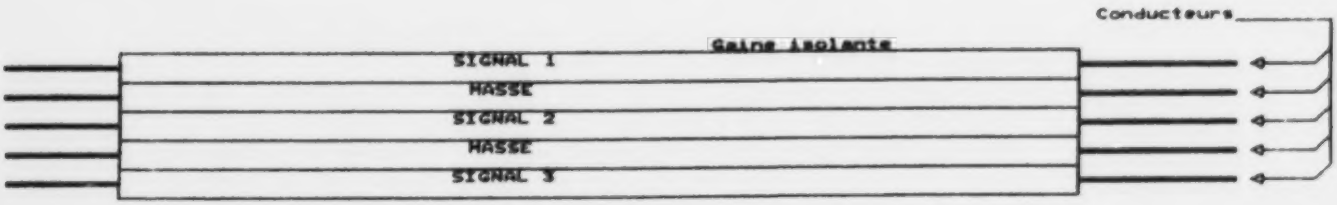


Fig. 2: Utilisation d'un câble plat

Le but de cette opération est de s'assurer qu'il n'y aura pas de mutuelle interférence entre deux signaux (crosstalking). Regardons les facteurs qui nous permettent de voir ce phénomène.

Premièrement, on sait que deux conducteurs séparés par un isolant donnent un effet capacitif. On sait de plus que ce condensateur laissera passer le signal dépendant de la fréquence. Regardons maintenant la formule nous permettant de calculer la valeur de l'impédance de ce condensateur à différentes fréquences.

$Xc = \frac{1}{2\pi fC}$ où

C est constant.

Xc = Impédance en ohms

f = Fréquence en hertz

C = Capacité en farad

La figure 3 nous montre la représentation électrique.

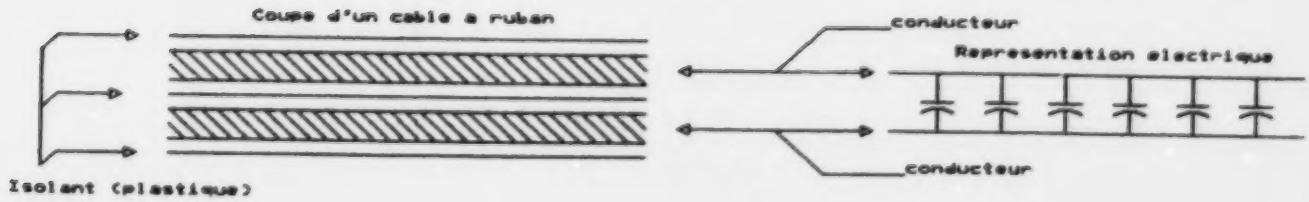


Fig. 3: Représentation électrique d'un câble plat

Si le signal est un niveau D.C., on peut dire que la période est infinie et que la fréquence tend vers zéro. Donc, l'impédance sera infinie, car il s'agira d'une barrière empêchant les signaux de se mélanger. Augmentons la fréquence et regardons ce qui se produit. La capacité étant constante, on remarque que l'impédance diminue à mesure que la fréquence augmente. Examinons un exemple précis. Ce genre de capacité peut varier de 1pf à 20pf. Regardons le pire cas à 20pf.

$Xc = \frac{1}{2\pi fC}$ Si C = 20pf et f = 60Hz

Xc = 132 MΩ Ce qu'on peut considérer facilement comme un circuit ouvert

Regardons le même problème mais à une fréquence de 10MHz (ce qui est très réaliste):

$Xc = \frac{1}{2\pi \times 10M \times 20pf} = 795\Omega$

On remarque qu'il y a possibilité qu'une partie du signal passe par cette capacité parasite. L'utilité de la masse entre deux conducteurs sera de court-circuiter la partie du signal qui dérivera de son chemin.

Il est aussi intéressant, lorsque c'est possible, d'utiliser des interfaces déjà standards comme le RS-232-C ou CENTRONICS

parallèle ce qui nous permettra de jumeler notre système à des périphériques déjà existants.

Finalement, il est très important de bien connaître les impédances d'entrées et de sorties des systèmes à interfacer afin de ne pas surcharger les signaux à utiliser.

On pourra, (cela s'avère même préférable dans certains cas) protéger les circuits intégrés d'entrées/sorties par des tampons (Buffer). Il faut toujours tenir compte du type d'utilisateur auquel nous avons affaire.

1.6 Dimensions

Le produit final est important pour le client et souvent il nous donnera des restrictions au niveau des dimensions. Ceci nous amènera quelques maux de tête lors de la conception du circuit imprimé. Nous pourrons évaluer les possibilités de se plier à ces exigences et informer le client des alternatives à envisager. Il existe des situations où nous n'avons pas de solution de rechange comme c'est le cas des cartes de circuit pour les ordinateurs IBM. Alors que faire? Établir des compromis à un autre niveau. On se servira par exemple des mémoires dynamiques plutôt que statiques, des PAL plutôt que des circuits de porte logiques, des circuits intégrés à haute intégration (POACH) ou encore, on utilisera la

technologie de "Surface Mount"; cette dernière nécessitera par contre un équipement approprié.

Il ne faut pas oublier toutefois que le montage du prototype avant circuit imprimé peut être tout à fait différent et indépendant du prototype final en circuit imprimé, car son premier objectif est de vérifier la faisabilité de votre conception. Mais il faut tout de même définir immédiatement les dimensions finales afin de bien distinguer la technologie que nous utiliserons.

1.7 Coûts matériels du prototype

Il peut paraître un peu étrange à ce stade de parler de coûts matériels puisque la conception n'est pas encore amorcée. On ne veut pas nécessairement fixer ce que seront les coûts de production ou de développement, mais il est très rassurant pour le client d'avoir un ordre de grandeur. On devra donc déterminer la proportion des contrats à faire à l'extérieur, le coût approximatif des composantes et le temps prévu pour le développement du prototype. Disons d'abord que les coûts du prototype et de production sont différents, mais ils ne sont pas pour autant indissociables. Nous devrons, dès la conception du prototype, envisager l'usage de composantes très utilisées sur le marché et surtout voir à se servir le moins de composantes de valeur différente.

Le temps de recherche est sûrement le paramètre le plus difficile à calculer. Il dépendra de votre expérience personnelle et de votre connaissance pratique des composantes utilisées. En créant un échéancier détaillé, vous pourrez faire une approximation du temps nécessaire. De toute façon, la recherche et le développement ne deviennent rentables qu'après quelques projets. Si vous avez la responsabilité de la recherche et de la production, vous aurez à fixer le coût de chaque circuit. Dans ce dernier cas vous devrez tenir compte de la quantité à fabriquer et ainsi diviser le coût du développement sur chaque circuit. En fait, plus la production sera importante moins le coût de développement augmentera le prix du produit. La quantité à la production sera aussi un facteur à déterminer. Dans le cas de production faible, on pourra s'occuper nous-mêmes du montage et de la vérification (production de 1 à 100 unités). Les productions moyennes pourront être réalisées avec l'aide de firmes extérieures spécialisées dans ce type de travail (production de 100 à 1,000). Pour les grandes productions, on aura recours à des firmes de grande envergure qui s'occuperont de toutes les étapes de production des circuits jusqu'à leur mise en boîte. Pour résumer, on pensera toujours à la production lorsque l'on fabriquera notre prototype, car une négligence sur le coût de quelques composantes sera multipliée lors de la production.

1.8 Standardisation

Un standard sert à uniformiser des paramètres pour différents systèmes. A moins d'être une compagnie qui a une grosse structure et qui ne nécessite pas l'utilisation d'aucun périphérique pouvant se greffer à son système, la standardisation est essentielle. Dans la plupart des cas, on doit en tenir compte, ne serait-ce qu'au niveau de l'alimentation électrique (ex: en Amérique 120 Volts 60 Hertz, en Europe 240 Volts 50 Hertz). De plus, la standardisation nous permet de rendre le fonctionnement de ces systèmes beaucoup plus accessible (ex: tout le monde sait qu'un interrupteur ON signifie en opération et OFF, hors d'opération). Dans le cas de systèmes ayant différentes entrées/sorties on devra, dans la mesure du possible, utiliser des formats existants. Dans l'univers des systèmes utilisant des ordinateurs on a des standards connus.

ex:	RS-232-C	:	Communication sérielle
	CENTRONICS	:	Interface parallèle pour imprimante
	Hayes compatible	:	Commandes de modem intelligent
	HP-GL	:	Groupe de commandes utilisées pour les traceurs
	etc...		

Par contre, si le système que vous concevez nécessite des périphériques que vous fabriquez et dont vous désirez être le fournisseur exclusif, vous n'avez pas intérêt à utiliser des

standards. Vous devrez alors vous attendre à atteindre un marché beaucoup plus restreint.

Voici donc, en résumé, quelques facteurs que vous devrez prendre en considération avant même de commencer votre travail de recherche. Revenons à notre compagnie qui a besoin d'un système mesurant la vitesse de projectile (balle de carabine) et posons ces quelques questions en guise de bilan-résumé.

- Est-ce un appareil portatif ou fixe?

  Rép: Il s'agit d'un système portatif pouvant être déplacé facilement.

- Le système sera-t-il situé à l'extérieur?

  Rép: Oui, mais par beau temps seulement. Il n'y aura ni pluie, ni neige.

- Quelles seront les températures d'utilisation?

  Rép: Ce sera l'été, de la fin du printemps au début de l'automne.

- Qui sera l'utilisateur du système?

  Rép: Ça pourrait être n'importe qui. Quelqu'un apte à tirer de la carabine et à actionner un bouton pour remettre l'appareil à zéro.

- **Ce système nécessite-t-il d'être soumis à des critères de sécurité?**

  Rép: Non pas particulièrement, car aucun contact physique ne devra être fait avec l'appareil lors de la prise de mesure.

- **Quel type d'interaction voulez-vous qu'il y ait entre le système et l'utilisateur?**

  Rép: Il devra y avoir un interrupteur pour la mise en marche, un voyant lumineux, un affichage permettant de lire la vitesse et un bouton permettant de remettre le système à zéro afin de passer à une autre mesure.

- **Avez-vous des exigences quant aux dimensions de l'appareil?**

  Rép: Non pas particulièrement en autant que le système ne soit pas trop lourd.

- **L'étude de marché que vous avez réalisée, vous a-t-elle permis de déterminer le coût approximatif de ce système?**

  Rép: Nous avons évalué pour débuter, que ce système pourrait se vendre entre 150 et 250 dollars pour une quantité de mille exemplaires.

Puisque la communication ne se fait qu'avec l'utilisateur la standardisation n'est pas nécessaire.

2.0 Croquis du système

Comme il s'agit d'un projet peu complexe, seulement quelques questions ont été nécessaires pour bien cerner la problématique. Nous allons maintenant esquisser un croquis de notre environnement.

1) Le projectile mesure environ ¼" par ¼" de diamètre.
   - Sa vitesse se situe entre 1500 et 3500 pieds par seconde.

2) Le système fonctionne à piles et utilise un microcontrôleur afin de s'occuper de la mesure, des calculs et de l'affichage.

Dessinons un croquis.

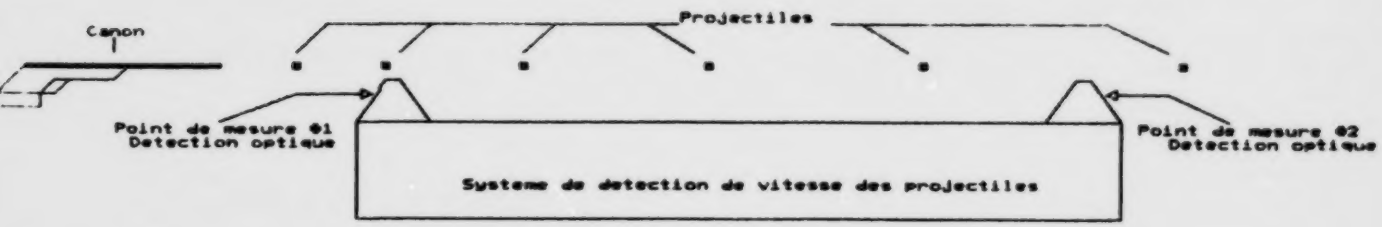


Fig. 4: Esquisse d'un système de mesure de la vitesse

Pour obtenir la vitesse, il faut connaître le temps que prendra le projectile pour franchir deux points dont on connaîtra la distance. Ce système devra posséder deux détecteurs de position ainsi qu'une horloge qui mesurera le temps. La vitesse instantanée est définie comme étant le temps nécessaire pour franchir deux points dont la distance tend vers zéro. Mais de façon pratique, cette distance sera la distance minimale sans que la vitesse instantanée ne soit changée. Dans notre cas, à cause du poids du projectile et de la poussée qu'il subit, on ne notera aucune modification de vitesse sur quelques pieds. Nous fixerons à deux pieds la distance maximale. Comme il s'agit d'un projectile très petit et de très grande vitesse, on pourra utiliser un système de détection optique que le projectile coupera lorsqu'il traversera le faisceau. Ici, nous devons trouver les composantes de base qui serviront à bâtir notre système. L'utilisation d'un schéma bloc nous permettra de modulariser les différentes parties de notre système.

Système de mesure.

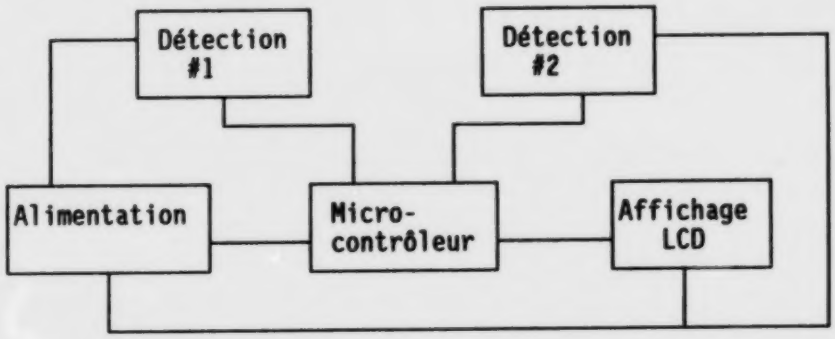


Fig. 5: Schéma bloc du système à concevoir

Comme on le constate, quatre parties différentes constituent notre circuit. On devra choisir nos composantes principales. Normalement, on choisit ces composantes en fonction de leur disponibilité sur le marché et de la documentation qui s'y rattache. Dans ce projet, il y a deux composantes principales, le microprocesseur et l'affichage à cristaux liquides. Le choix d'un microcontrôleur est tout indiqué pour ce genre de projet. Comme on le mentionnait un peu plus tôt, la disponibilité et la documentation sont des éléments importants, mais on devra également tenir compte des outils de développement que nous offre un microcontrôleur plutôt qu'un autre. La Compagnie INTEL nous propose une gamme complète de ces outils: langage d'assembleur, langage évolué (PLM), émulateur, système cible etc... Mais pour l'application actuelle, le 8051 est tout indiqué pour notre projet. Il n'est pas coûteux (environ $4.00) et contient les éléments nécessaires. Nous ferons la programmation en langage PLM. Quant à l'affichage, nous en choisirons un à quatre chiffres.

N'utilisez pas les originaux, faites-vous plutôt des copies des spécifications des composantes, car il est intéressant d'inscrire des notes ou calculs s'appliquant à votre circuit. Avec l'aide des spécifications on vérifie la compatibilité entre les différentes composantes. A ce stade, on doit être en mesure de concevoir le schématique de notre circuit.

3.0 Utilisation de logiciel D.A.O.

L'ordinateur a pris une place importante en électronique. Non seulement à cause de sa constitution mais en tant que support et outil de travail. Grâce à ces logiciels, les croquis ou esquisses sont, dès les premiers instants, mis au propre et contiennent toutes les informations nécessaires. De façon générale, tous ces logiciels se ressemblent et offrent à peu près les mêmes caractéristiques. Toutefois, après en avoir utilisé quelques-uns, il y a des choses qu'il faut regarder attentivement avant de faire l'acquisition de tels logiciels.

Notre choix s'est arrêté sur le système ORCAD. Ces principaux avantages sont: facile à utiliser (l'apprentissage se fait en quelques heures), possède une librairie de plus de 3500 composantes. La documentation est un ouvrage de référence; on peut donc utiliser le logiciel sans consulter la documentation. Dans un logiciel de cette catégorie, on doit retrouver plusieurs utilitaires nous permettant d'obtenir différents types d'information provenant de notre dessin. Nous ne donnerons pas l'explication des commandes car nous ne voulons pas vous imposer ce logiciel en particulier. Mais regardons les programmes utilitaires qu'il possède.

a) DRAFT: C'est le programme principal qui nous permet de dessiner le circuit que l'on conçoit. L'opération n'est pas plus compliquée que l'utilisation d'une table à dessin.

b) ANNOTATE: Ce programme nous permet de numéroter chaque composante (U?, R? deviendront U1, R3, etc...).

c) BACKANNO: Il arrive qu'après avoir fait le circuit imprimé certaines composantes aient changé de nom. Cet utilitaire nous permet de remettre notre dessin à date.

d) CROSSREF: Cet utilitaire permet de créer une liste des composantes en indiquant leur location.

e) ERC: Cet utilitaire vérifie certaines lois électriques. Il vérifie si toutes les connexions sont logiques, s'il y a des courts-circuits, des circuits ouverts, des entrées non-branchées, etc...

f) LIBEDIT: Ce programme permet de créer vos propres composantes ou de modifier des composantes existantes. Il est intéressant de constater qu'on utilise une partie des commandes se trouvant dans le module "DRAFT".

g) NETLIST: Cet utilitaire nous branche avec le monde extérieur. Ce programme bâtit la liste des connexions se trouvant dans votre circuit. Un fait intéressant est que ce programme génère

des listes de connexions pour toute une gamme de logiciels de fabrication de "ARTWORK", notamment pour les formats suivants: ALGOREX (Sm ARTWORK), APPLICON, CADNETIX, CALAY, COMPUTER-VISION, EE DESIGNER, EDIF, FUTURENET, INTERGRAPH, MULTIWIRE, PCAD, SPICE, RACAL-REDAC, SALT, SCICARDS, TANGO, TELESIS et VECTRON. Notons que ce programme nous permet de créer le lien indispensable avec la plupart des logiciels de conception.

h) PARTLIST: Ce programme nous permet de créer la liste des composantes nécessaires pour le montage.

i) PLOTALL: Il nous permet d'avoir le résultat de notre schématique sur un traceur.

j) PRINTALL: Même utilité que "PLOTALL" mais le périphérique est l'imprimante.

Ce sont donc les utilitaires les plus rencontrés dans ce type de logiciel. Pour en revenir à notre projet, nous dessinerons le plan de notre circuit (voir fig. 6).

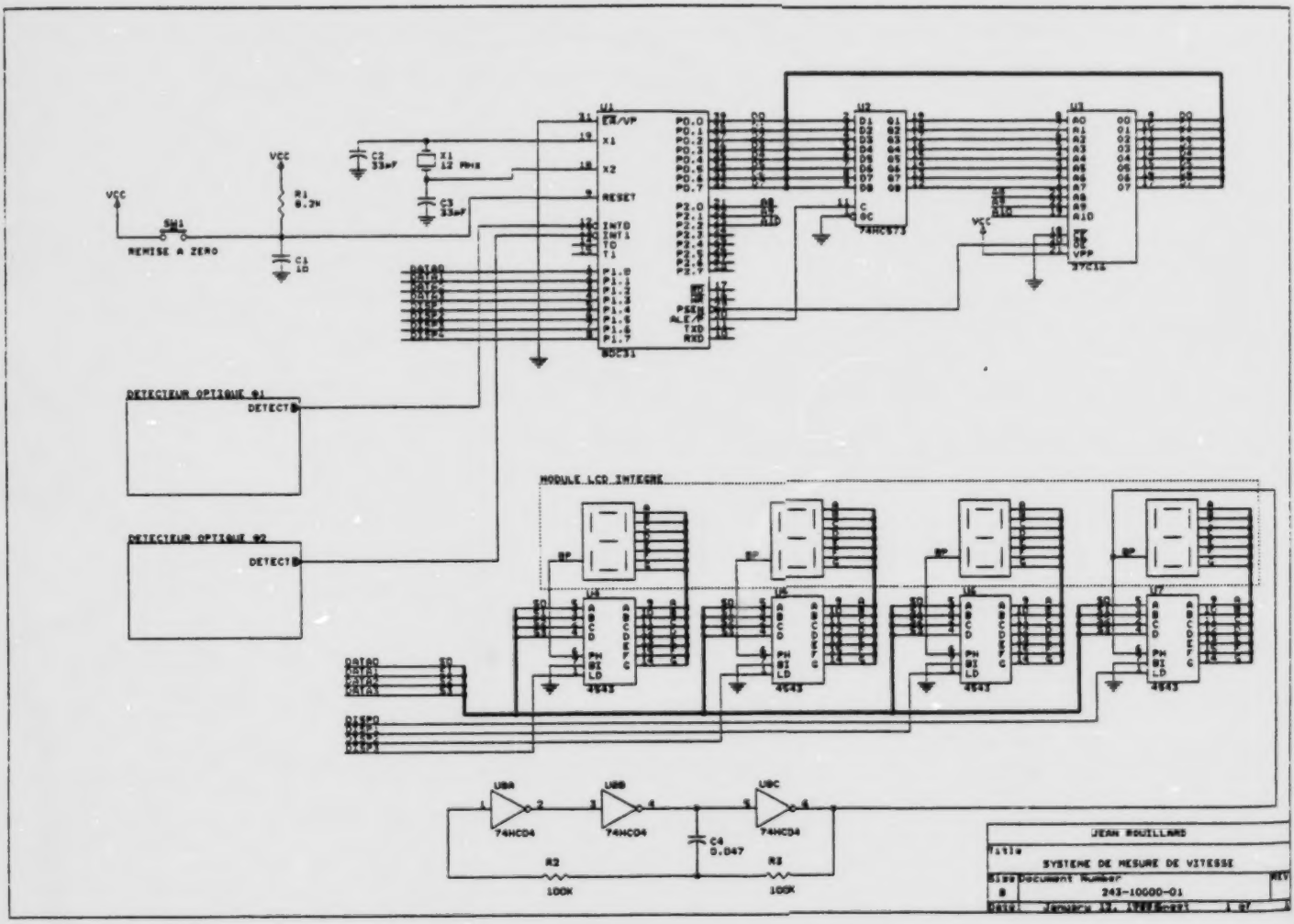


Fig. 6: Schématique du système de mesure de la vitesse

4.0 Les systèmes d'essais

A ce stade, on n'a pas à réaliser encore de circuits imprimés. On doit utiliser des systèmes nous permettant de faire des changements facilement. Deux systèmes sont actuellement utilisés. Il s'agit des plaquettes blanches et du wire-wrap. Le premier sera utilisé pour les tests sur les parties analogiques. Ex: système de détection optique.

L'utilisation du wire-wrap est maintenant très populaire car elle permet de monter des circuits numériques très complexes et de les modifier facilement. Le principe de fonctionnement est d'utiliser du fil très petit (no. 26 à 32) qu'on enroule autour de broches carrées. Les supports à circuits intégrés ont des broches d'environ $\frac{1}{4}$ pouce de long. On emploie des outils spéciaux pour faire les connexions, aucune soudure n'est alors requise ce qui facilite beaucoup les modifications. Certaines conditions doivent par contre s'appliquer. Il faut toujours découpler l'alimentation en plaçant un condensateur d'environ 0.1 μF à chaque circuit intégré et ce, le plus proche possible des broches d'alimentation du circuit intégré. Un autre condensateur d'environ 22 μF sera placé sur le circuit à l'entrée de l'alimentation externe. De plus, à cause de la grosseur des fils (fils #30), il est recommandé que la masse de chaque composante soit reliée en un seul point (masse en étoile) plutôt qu'un à la suite de l'autre (masse en chaîne). S'il y a des "BUS", il est préférable que les fils ne soient pas placés en

fils ne soient pas placés en parallèle afin de ne pas favoriser le "crosstalk". Le wire-wrap consiste à entourer un fil autour d'une broche. En conséquence, ces circuits ne doivent pas être utilisés dans les applications à long terme, car il se forme de l'oxydation qui peut entraîner des problèmes intermittents.

Le wire-wrap sera utilisé pour les essais sur la partie numérique (microcontrôleur). C'est à cette étape que nous ferons la programmation du microcontrôleur. On a le choix de deux langages: l'assembleur avec le logiciel EMAT (logiciel développé par Guy Tessier professeur au département d'électrotechnique) ou le langage PLM (langage évolué). Pour notre application, le PLM semble très bien indiqué pour les calculs qui devront être faits.

L'étape suivante consiste à simuler l'action d'un projectile. Pour ce faire, nous utiliserons, dans un premier temps, un circuit qui générera deux impulsions servant à simuler le projectile.

Nous devrons donc calculer le temps entre les deux impulsions. Si la vitesse est de 2000 pieds par seconde et que la distance entre les deux capteurs est de 2 pieds alors le temps nécessaire pour le projectile sera:

Ex: Vitesse 2000 pi/sec.

Distance: 2 pi

Donc, si 1 sec. = 2000 pi

x sec. = 2 pi

Le temps = $\frac{1 \times 2}{2000}$ = 1 m sec.

En passant, notre microcontrôleur n'aura aucune difficulté à fonctionner puisque sa vitesse est mille fois plus rapide. On pourra utiliser des monostables dont le premier déclenchera le deuxième, un millième de seconde plus tard. La prochaine étape consistera à simuler le passage du projectile grâce au système de détection. Si la longueur du projectile est de un demi-pouce et que sa vitesse est de 2000 pieds par seconde, il faudra évaluer la largeur d'impulsion que cela générera.

Ex: Vitesse = 2000 pi/sec.

Longueur du projectile = $\frac{1}{2}$ pouce

1 sec. = 2000 pieds

x sec. = $\frac{1}{2}$ pouce

L'impulsion aura une largeur de $\approx \frac{1}{50000 \text{ sec.}}$

soit environ 20 μsec. ce qui est suffisamment long. Il faudra s'assurer que le système optique peut répondre à ces vitesses.

Lorsque les tests et les simulations seront complétés, on fera les corrections, sur le schématique, qui auront pu être occasionnées par les modifications faites pendant les essais. Lors des essais, on aura recours à certains outils. Ces outils permettent de simuler ou de voir comment se comporte notre circuit dans certaines conditions.

4.1 L'émulateur ROM

Ce système nous permet de remplacer le EPROM par une mémoire RAM facilement modifiable. Les mémoires de type EPROM nécessitent beaucoup de temps pour les programmer et nous devons tout recommencer lorsqu'un changement s'impose. Le transfert des données se fait à partir d'un ordinateur personnel avec l'aide d'un port série. Ce système permet de faire des centaines d'essais comparativement aux EPROM qui nous limite à 5 ou 6 essais pour une même période.

4.2 L'analyseur d'état logique

Cet appareil est primordial pour le développement de système à base de microprocesseurs. Il est souvent divisé en deux fonctions distinctes. La première consiste à lire les signaux digitaux et à mémoriser les actions faites par le microprocesseur pendant un

certain temps. Le système nous permet de se synchroniser sur un événement que l'on prévoit et qui nous servira de référence. L'autre fonction est spécifique au microprocesseur utilisé. On peut, avec l'aide d'un connecteur qui sera branché en parallèle avec le microprocesseur, désassembler les instructions exécutées par le microprocesseur. Ceci est intéressant si on veut voir comment le système procède dans les différentes fonctions que l'on a programmées. Il peut, comme dans le premier cas, se synchroniser sur une instruction à une adresse précise et mémoriser un certain nombre d'instructions qui suivront.

4.3 L'oscilloscope

Évidemment, l'oscilloscope sera très utile, car cet équipement de base servira à mesurer les différentes tensions ou forme de signaux dans le circuit.

5.0 La fabrication du "ARTWORK"

Avant de passer à cette étape, on doit s'assurer que tout le circuit fonctionne et que le schématique a été complété et vérifié. On utilise les programmes de vérification sur notre dessin électronique jusqu'à ce qu'aucune erreur ne persiste. Il faut cependant faire attention, car il arrive que ces logiciels nous donnent des erreurs et des avertissements. Ces avertissements indiquent que le programme détecte la possibilité d'erreur, vous devrez interpréter l'avertissement et voir s'il y a effectivement un problème. Par exemple, le logiciel lit qu'une composante a un signal défini comme étant bi-directionnel; ce signal est relié à une autre composante dont le signal est défini comme une sortie. Pour le logiciel, il y a deux possibilités: entrée branchée à une sortie, ce qui ne cause aucun problème, et sortie branchée à une autre sortie, raison pour laquelle il a donné un avertissement. Si vous aviez préalablement déterminé par programmation qu'il s'agit d'une entrée, vous en concluerez donc que l'avertissement ne s'applique pas.

Lorsque les erreurs et avertissements sont réglés, on peut entreprendre l'impression ou le traçage de nos dessins. Un dernier coup d'oeil pour vérifier si tout est complet et on passe à l'étape du "netlist". Il faut, à ce stade, que vous sachiez avec quel logiciel vous réaliserez votre "ARTWORK". Le "netlist" constitue la liste des connexions entre les composantes. Il peut parfois

contenir l'information qui identifie les dimensions physiques de la composante. Il existe deux sortes de logiciel. Il y a les traceurs manuels, c'est-à-dire que l'usager doit établir les connexions physiques une à une. Le logiciel SMARTWORK fonctionne de cette façon. Les avantages de ce logiciel est qu'il génère peu de via (un via est un trou qui permet de faire les connexions d'une face à l'autre) et qu'il est très facile d'utilisation. Il s'agit en quelque sorte de la bonne vieille méthode d'application de ruban (TAPE) sauf que dans ce cas-ci, le ruban est remplacé par l'écran cathodique. L'avantage est qu'il ne décolle pas et qu'il contient une certaine intelligence. SMARTWORK, par exemple, est capable de lire les connexions physiques que nous avons faites et de les comparer avec le contenu du "netlist" de notre schématique. Puis, il nous donnera la liste des courts-circuits et des circuits ouverts se trouvant sur notre "ARTWORK". De plus, le système à logiciel nous permet de garder notre information sur des formats réduits. Le coût de ces logiciels est souvent inférieur à mille dollars. Mais si on compte le coût du matériel (ruban) pendant quelques sessions, on réalise rapidement que ce procédé est très rentable grâce aux économies qu'il nous permet de réaliser à long terme.

Un autre type de logiciel trace automatiquement le "ARTWORK" à partir du "netlist" fourni par le logiciel schématique. Il peut aussi placer automatiquement vos composantes. Par contre, il n'y a que les gros logiciels qui font du bon travail pour le placement automatique. Cette étape est parfois plus facile lorsque vous

placez vous-même les composantes. Le coût de ces logiciels est aussi beaucoup plus élevé. Un logiciel de cette catégorie se détaille à environ 2000 dollars et plus.

Mais revenons une fois de plus à notre circuit. Nous avons besoin des dimensions physiques de chaque composante. Ceci peut se faire soit en mesurant les pièces ou en utilisant les mesures se trouvant sur les feuilles de spécifications. Vient ensuite l'étape de déterminer les dimensions de notre plaque. Il faut noter que la surface et le nombre de trous sont proportionnels aux coûts de fabrication, nous devrons donc en tenir compte. Pour notre circuit, nous n'aurons pas nécessairement de difficulté étant donné le peu de composantes dans notre circuit. On utilisera alors le logiciel SMARTWORK et nous fabriquerons notre plaque de façon manuelle.

Les logiciels de fabrication de "ARTWORK" nous offrent des sorties standards. Les formats HP-GL et DM-PL sont utilisés pour le traçage en simple ou double grandeur de notre circuit. Différentes informations sont disponibles telles que:

a) Le côté composante
b) Le côté soudure
c) Le "SILKSCREEN"
d) Le "SOLDER MASK" (les deux côtés)

On peut aussi avoir le traçage en format "GERBER". Ce format est très utilisé avec les photo-plotter. Certains logiciels nous offrent aussi le format Excellon @ "NC-DRILL". Ce format est employé avec les perceuses à contrôle numérique. La plupart du temps, ce format est disponible sur papier perforé, mais il a tendance à disparaître.

Il ne nous reste qu'à faire tracer nos dessins et à réaliser le circuit imprimé (voir la partie B).

6.0 Montage du prototype

Comme on utilise des logiciels qui vérifient l'exactitude du "ARTWORK" avec le "netlist" du schématique, il serait très improbable qu'il y ait des erreurs au niveau du circuit imprimé. Le montage des composantes devrait être une simple routine. Ce ne serait pas nécessairement vrai si notre circuit fonctionnait sur des fréquences radio. Car pour ces circuits, l'emplacement des composantes peut être un facteur important dans leur fonctionnement.

Après avoir terminé le montage des composantes, on effectuera quelques tests avant d'alimenter le circuit. Un test consiste, avec l'aide d'un ohmmètre, à vérifier la résistance entre les bornes positive et négative de notre alimentation. S'il y a court-circuit, il faudra voir à réparer cette situation avant de brancher l'alimentation. Par la suite, il suffit de brancher le circuit et de vérifier avec l'oscilloscope la présence de signaux de référence qui nous indiqueront si les fonctions majeures du système sont opérationnelles. Si tout fonctionne bien, on procède alors à l'essai du système en milieu naturel. Lorsque tous les aspects du circuit ont été vérifiés, on effectue les tests qui évalueront les spécifications de notre circuit. Ces spécifications seront utiles pour la préparation des tests de la production.

7.0 La production et les tests

On ne peut pas, dans plusieurs cas, se permettre de lancer un produit sans connaître la limite de ses capacités. Beaucoup de compagnies font ce test dans le but de vérifier la marge de manoeuvre qu'ils se sont donnés pour la réalisation d'un produit. Ceci permet d'évaluer quels seront les coûts reliés à la garantie. Ces tests vont souvent jusqu'à la destruction complète de l'appareil, mais je ne crois pas que ce soit nécessaire dans tous les cas. Certains tests vérifient le comportement de l'appareil dans des conditions extrêmes. Par exemple, le "burnin test" permet, après la production, de déceler les composantes qui ont des faiblesses. On appelle aussi ce test "test de mortalité infantile". Il consiste à essayer l'appareil dans des conditions de températures extrêmes pendant une période très grande. Lorsque utilisé, ce test diminue de beaucoup les coûts de garantie.

Finalement, la production est une étape dont on n'a pas souvent à s'occuper (au niveau de la réalisation), car de plus en plus, des systèmes automatisés d'insertion des composantes font le travail pour nous et des bains de soudure s'occupent d'assembler les quelques 500 points de soudure en quelques secondes. Il arrive parfois que la compagnie qui produit ce type d'appareils vous demande de réaliser la partie de la chaîne qui s'occupe de la vérification des circuits. Dans ce cas, vous devrez utiliser votre

ingéniosité pour réaliser un système de vérification qui sera le plus fiable possible.

Voici donc quelques éléments qui vous permettront, je l'espère, de réaliser un projet dans les plus brefs délais. La clé du succès réside dans la simplicité et la versatilité des outils que vous utiliserez. Mais surtout n'hésitez pas lorsque vous pouvez bâtir vous-même vos propres outils car il s'agit sûrement de la meilleure façon d'apprendre à concevoir un circuit électronique.

PARTIE B

LE CIRCUIT IMPRIMÉ

SECTION I

LA FABRICATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS

INTRODUCTION

Le circuit imprimé est un pilier important dans les étapes de conception électronique. C'est souvent lui qui déterminera la qualité du produit développé. Bien que les composantes électroniques soient d'utilisation générale, le circuit imprimé est toujours rattaché à une application particulière. C'est la partie qui permet de former un tout et d'inter-relier les composantes. L'étape du circuit imprimé est essentielle et ne doit pas être négligée en aucun point. Sans le circuit imprimé, le projet demeure une réalité théorique qui n'a aucune utilité.

Une industrie complète s'est bâtie autour de cette technologie. Bien que le Québec n'en soit qu'à ses débuts dans le domaine, les japonais et nos voisins du Sud ont développé un marché de niveau international dont le chiffre d'affaires se situe aux alentours de 12 milliards de dollars U.S. par année. Les fabricants de produits électroniques consomment plus de 500 millions de pieds carrés de ces circuits à chaque année. Ce qui correspondrait à une surface de cuivre d'environ 19 milles carrés et on aura, d'ici 1990, atteint les 2,000 milliards de points soudure. Cette industrie permet à plus de 200,000 personnes de travailler dans ce secteur. Bien que les asiatiques aient développé des méthodes de production automatisées pour de grandes quantités et à des coûts très réduits, les américains demeurent les dirigeants avec une production atteignant les 4.8 milliards de dollars annuellement en fabrication de circuits. Aux États-Unis on dénombre entre 2,000 et 3,000 fabri-

cants. Puisque présentement il s'agit de la seule façon d'interconnecter les composantes dans la réalisation de production, on entrevoit pour 1995 des retombées de plus de 30 milliards de dollars.

Pour 1988, on prévoit un chiffre de 6671.1 millions de dollars distribués comme ceci: (source: Kirk-Miller associates)

Ordinateurs	3600.4 millions
Militaires + spatiales	783.7 millions
Communications	710.0 millions
Instrumentation	676.9 millions
Produits de consommation	454.2 millions
Électroniques industrielles	367.8 millions
Équipement de bureau	76.8 millions

Voici donc un domaine auquel nous devons accorder une attention particulière dans la réalisation de projet.

1.0 Qu'est-ce qu'un circuit imprimé?

Physiquement, il s'agit d'une plaque constituée d'une matière isolante recouverte de cuivre. Le nombre de couches peut varier selon la complexité du circuit (de une à seize couches). Les surfaces de cuivre sont traitées de façon à être gravées ou plaquées pour laisser comme surface cuivrée les connexions nécessaires au bon fonctionnement du circuit. Finalement, les composantes sont placées et soudées sur le circuit imprimé. Le circuit imprimé nous apporte beaucoup d'avantages sur les méthodes nécessitant des connexions avec des fils. En voici quelques-uns:

1) Facile à fabriquer (production)
2) Facile à réparer
3) Densité des composantes intéressantes
4) Facile à reproduire

2.0 Types de circuits imprimés

Rigides

les circuits rigides se divisent en trois groupes distincts selon le nombre de côtés pour les conducteurs.

a) Simple côté: Comme son nom l'indique, il n'y a qu'une surface cuivrée et il est surtout utilisé pour des circuits pas très compliqués.

b) Double côté: Deux surfaces sont recouvertes de cuivre. On l'utilise pour des circuits plus complexes. On peut plaquer des trous afin d'obtenir un circuit de meilleure qualité.

c) Multi-couche: Ce système permet d'obtenir des circuits à très forte densité. L'équipement nécessaire pour la réalisation de ces circuits nécessite beaucoup de travail. Ici le plaquage des trous est essentiel.

Le choix du type de circuit doit tenir compte de la complexité, des critères de fabrication et de l'application du produit fini. Généralement, le circuit simple côté est le moins coûteux, le multi-couche le plus coûteux et le double côté, le plus populaire.

Flexibles

Les circuits flexibles sont utilisés lorsqu'on a peu de place pour disposer les circuits rigides. Les circuits flexibles sont aussi très légers. On utilise comme matière flexible le "KAPTON". Généralement, un circuit flexible de même grandeur et de même complexité qu'un circuit rigide est beaucoup plus dispendieux.

3.0 Pourquoi enseigner la fabrication de circuits imprimés?

Il s'agit ici d'un procédé industriel qui évolue énormément et qui permet à l'étudiant de découvrir un procédé qui touche à la physique, à la chimie et aux mathématiques dans une application industrielle. La fabrication lui permet de comprendre tout le cheminement nécessaire pour créer un circuit imprimé comme la conception de "ARTWORK", et de se familiariser avec la disposition des composantes (contraintes), les techniques photographiques, la chimie des polymères, les effets de la chimie, les principes de plaquage et le perçage. Dans ce domaine, l'étudiant est confronté en tout temps avec les mêmes contraintes et problèmes rencontrés en industrie. Cela lui permet ainsi de connaître les standards et méthodes utilisés en industrie.

Cette étape permet aussi à l'étudiant d'obtenir un "feedback" très réel de ses réalisations, ce qui ajoute une source de motivation très intéressante. Mais regardons maintenant la fabrication comme telle de circuits imprimés.

4.0 La fabrication de circuits imprimés

4.1 La lamination de cuivre

Il s'agit de la première partie du procédé. Elle consiste en une feuille isolante recouverte d'une mince couche de cuivre. La matière isolante est composée de résine comme le phénolic, le polyimide, le polyester ou plus fréquemment, d'"epoxy" et de fibres comme le papier, le teflon et le fibre de verre. L'épaisseur varie de 0.002" jusqu'à 0.250"; les épaisseurs retrouvées le plus souvent sont: 0.032", 0.047", 0.062", 0.093" et 0.125". L'épaisseur du cuivre est calculée en onces par pied carré. Une once au pied carré correspond à une épaisseur de 0.00135". On retrouve sur le marché des épaisseurs variant de une demie à trois onces au pied carré. Les feuilles sont généralement d'une grandeur de 3' x 4' et sont protégées contre l'oxydation de l'air. Lorsqu'on veut créer une plaque, on doit couper une section de la feuille.

4.2 L'exposition

i) La surface photosensible

La fabrication du circuit imprimé est un procédé soustractif. Il consiste à enlever une partie du cuivre sur la plaque en laissant des chemins nécessaires pour les connexions. Pour différencier la

surface à graver de celle que l'on veut préserver, on doit appliquer un produit chimique sensible à la lumière sur le circuit. On transportera par la suite le masque sur le circuit.

Les méthodes pour sensibiliser le produit chimique sont variées. Une méthode peu coûteuse consiste, avec l'aide d'encre, à tracer les conducteurs à la main. Toutefois, ceci ne permet pas d'élaborer des circuits complexes et de bonne qualité. Aujourd'hui, par contre, on a amélioré ce procédé en utilisant la sérigraphie. Cette technique d'impression en série est surtout employée en production car elle est très rapide. Une autre méthode consiste à enduire la plaque d'un produit photosensible. La plaque est alors trempée dans un liquide puis exposée à la lumière en s'assurant qu'un masque interfère.

ii) Les films photosensibles

En 1968, la Compagnie Dupont mettait sur le marché un film sensible à la lumière. L'application de ce film se fait en chauffant à la fois la plaque et le film tout en appliquant une pression. Il est évident que ce procédé allait permettre très facilement l'application de matériel photosensible. Le film fut adopté rapidement par l'industrie grâce à sa grande précision. Trois ans plus tard, le film photosensible s'est acquis 55% du marché et aujourd'hui, ce procédé est le plus utilisé en industrie.

Ce film est un photopolymère dont l'épaisseur varie de 0.5 à 3.0 millième de pouce. Il est isolé d'un côté par un mylar et de l'autre côté, par un film polyolefin. Ces films peuvent être sensibilisés de deux façons, soit négativement ou positivement.

négativement: La surface exposée aux ultraviolets deviendra insoluble dans la solution de développement.

positivement: C'est l'inverse du procédé négatif. Après exposition les parties exposées deviennent solubles. Par contre, il n'existe pas présentement de produit qui utilise le procédé positif.

Lorsque l'exposition aux rayons ultraviolets est effectuée, il est possible d'apercevoir le masque imprimé sur le film photosensible. Le fait de voir à ce stade le masque, nous permet d'évaluer si le procédé vaut la peine d'être poursuivi. On peut retrouver ce film en largeur de 24 pouces et en longueur de 400 pieds.

La figure suivante nous montre le fonctionnement du film.

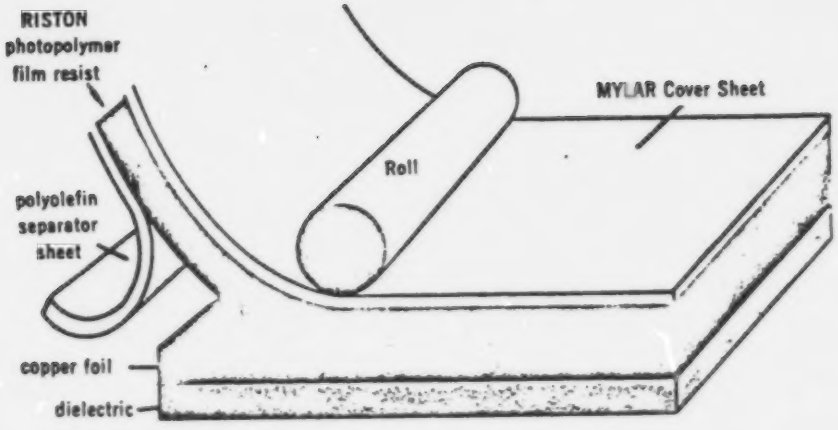


Fig. 7: Constitution du film photosensible

Lorsqu'on laminera, un premier séparateur (polyolefin) s'enlèvera automatiquement. Le séparateur en mylar restera jusqu'au développement pour protéger le film. Puis, un système permettra de chauffer et de presser le film sur la plaque.

Il ne faut toutefois pas oublier que le film est beaucoup plus dispendieux que les liquides. Mais si nous regardons ses nombreuses performances, son utilisation est tout à fait justifiée lorsqu'on est d'abord préoccupé par l'efficacité et la rentabilité. Examinons les avantages du film par rapport aux liquides:

a) Épaisseur et consistance uniformes
b) La reproduction est simple
c) Minimum de gaspillage
d) Rapide et facile à utiliser
e) Bon pour du travail de précision
f) Facile à utiliser avec l'électroplaquage
g) Réduction des retouches manuelles

Comme nous l'avons vu, la plupart des films ont une réaction négative. Nous aurons à considérer si le masque doit être positif ou négatif. Si on ne métallise pas les trous, on se servira d'un négatif, mais dans le cas inverse, on utilisera un positif. La plupart du temps, un système CAD nous générera un "ARTWORK" à deux fois la grandeur.

Lorsque nous avons notre négatif ou positif, on l'applique sur le film photosensible. Il faut toujours se souvenir que les surfaces exposées aux rayons ultraviolets seront durcies. Toutes les surfaces non exposées seront lavées par la solution de dévelop-

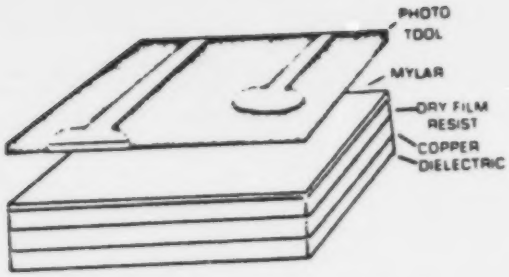
pement. Ces opérations doivent être effectuées avec un éclairage qui filtre les rayons ultraviolets.

Certains facteurs sont importants pour avoir une exposition de bonne qualité. Il y a bien sûr la qualité du masque, la qualité de la source lumineuse, le temps d'exposition et la distance entre le masque et le film photosensible. La règle à suivre concernant le masque (négatif) est "garbage in, garbage out". L'image sur le film photosensible ne pourra jamais être de meilleure qualité que le masque lui-même. Pour obtenir de bons résultats, il est préférable d'utiliser un système d'exposition dédié à ce genre de travail. Le temps d'exposition détermine aussi la qualité. Si les lignes sont plus minces que prévu alors votre film a été sous-exposé. Un autre problème souvent rencontré est la disposition comme telle du négatif. En effet, le côté émulsion de votre négatif (le côté mat) doit toujours être déposé sur le film photosensible. Un système permettant d'appuyer le négatif fermement sur le film éliminera toute forme de distorsion.

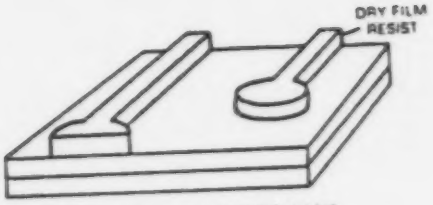
4.3 Le développement

Le développement du film photosensible nous permettra de dissoudre les parties qui n'étaient pas exposées. Cette étape, d'une durée approximative de deux minutes, est assez simple et ne cause pas de problème. On termine par un bon rinçage et le séchage

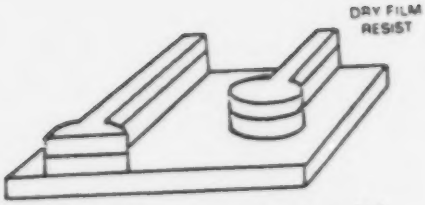
de la plaque. Lorsque la plaque est sèche, on peut alors, s'il y a lieu, procéder aux retouches. La figure de la page suivante nous illustre les quatre étapes de la progression du développement.



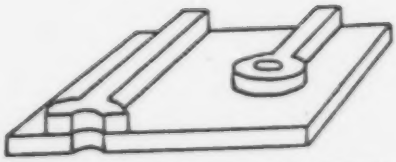
1. Image a panel covered with dry film resist using a negative phototool (clear lines with black background).



2. Develop away unexposed resist.



3. Spray-etch to remove unwanted copper.



4. Remove resist with photoresist stripper. (Illustrated panel has been drilled after it was etched.)

Fig. 8: Développement du film photosensible

4.4 La gravure

La gravure est sûrement l'opération la plus simple du procédé. Elle consiste à dissoudre le cuivre non protégé par le film photosensible préalablement durci. Après cette étape, on peut considérer le circuit comme utilisable.

Il existe quelques produits chimiques pouvant dissoudre le cuivre. Par exemple, le chlorure de fer, qui est de couleur brune, peut absorber 10 à 12 onces de cuivre par gallon. Sa qualité principale est sa rapidité d'action. Cette rapidité diminue avec l'usure de l'acide. La température d'utilisation de ce produit chimique est de 110°F. La figure ci-dessous nous montre la courbe du temps en fonction de l'absorption de cuivre par l'acide.

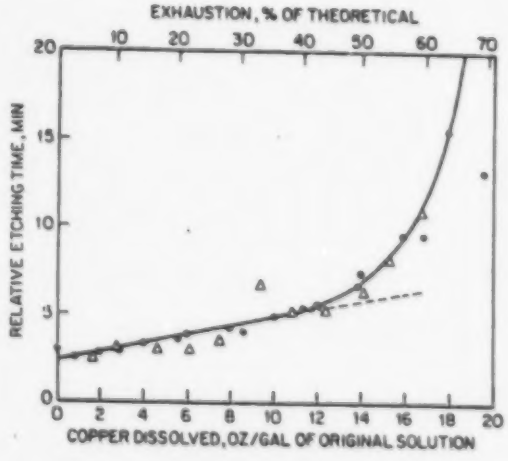
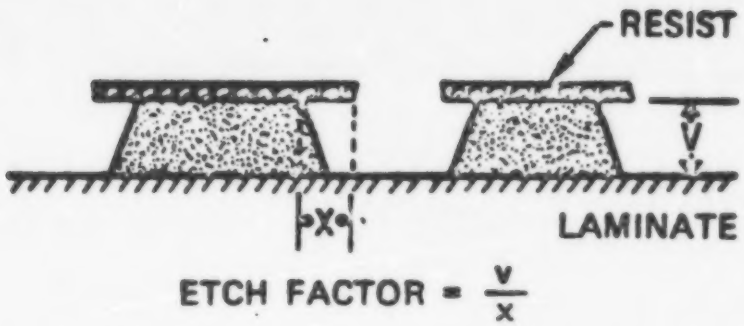


Fig. 9: Courbe de comparaison des produits chimiques utilisés pour le "Etching"

Un autre produit utilisé est le persulfate de sodium. Il est plus propre et ne s'attaque pas au plomb/étain. (On verra un peu plus loin quelle sera son utilité). Il peut dissoudre de 8 à 10 onces de cuivre par gallon et son prix est relativement bas. Pour la production, on utilise des graveurs à base d'ammoniaque, ils sont très rapides et peu coûteux. Les systèmes à jet sont très utilisés pour la gravure, car lorsque la solution entre en contact avec le cuivre, elle se sature en surface; si on ne fait pas circuler la solution, le procédé sera considérablement ralenti. Cet effet de ralentissement fera en sorte que les lignes très fines seront menacées par la gravure latérale et ce sera pire encore dans le cas où le cuivre ne sera pas très épais.

Certaines normes doivent être respectées comme la gravure latérale. En pratique, dans le cas des systèmes à jet où la plaque est verticale, il n'y a pas beaucoup de problèmes. Donc, il est important de ne jamais surexposer la plaque à la gravure surtout si votre circuit contient des lignes très fines.

Regardons le problème:



An etch factor of 1/1 is usually considered practical.
Higher factors may be specified for some applications.

Fig. 10: Étude du problème de la gravure latérale

Lorsque la gravure est terminée, il faut enlever le matériel photosensible qui, jusqu'à présent, protégeait notre cuivre. On appelle cette étape le "STRIPPING".

Dans le cas d'un système qui ne métallise pas les trous, le perçage se fait en dernière étape. Il existe des perceuses automatisées qui simplifient le travail. Mais on peut aussi percer les plaques à la main surtout si le nombre de trous n'est pas élevé. (Les machines automatisées nécessitent beaucoup de préparation). Le fibre de verre n'est pas un matériel facile à percer (imaginez-vous perçant des trous dans du verre). On aura avantage à utiliser des mèches au carbure. Par exemple, une mèche ordinaire pourra percer environ 100 à 200 trous tandis que les mèches au carbure peuvent percer jusqu'à 5,000 trous. Les perceuses automatisées peuvent tourner jusqu'à 200,000 RPM comparativement aux perceuses manuelles qui ne tournent qu'à 20,000 RPM.

Le cuivre est un matériel qui s'oxyde facilement au contact de l'air. Pour un travail de bonne qualité, il faut faire un plaquage au plomb/étain. On peut réaliser ce travail par électro-chimie ou par immersion. Cette dernière option ne permet pas un plaquage épais, mais peut se faire sans l'utilisation d'un bloc d'alimentation spécial. Le principe est d'échanger une molécule de cuivre avec une molécule de plomb/étain, ce qui explique que le plaquage est seulement en surface.

Ce dont nous avons parlé, c'est de la base de fabrication. Aujourd'hui, on commence à saisir l'importance d'un circuit de bonne qualité et l'arrivée des systèmes nous permettant de métalliser les trous acquiert de plus en plus de popularité. Dans le prochain chapitre, nous verrons en détail le fonctionnement de cette technologie. Notons qu'il y a quelques années, un laboratoire de ce type coûtait des centaines de milliers de dollars. Nous avons réalisé ce laboratoire pour moins de trente mille dollars.

SECTION II

RÉALISATION DE CIRCUITS IMPRIMÉS AVEC MÉTALLISATION DES TROUS
(Plated thru)

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la technologie de fabrication de circuits imprimés connaît une évolution importante, tant au niveau de la qualité que des nouvelles techniques employées.

La fabrication de circuits imprimés multicouche ou de circuits flexibles est maintenant chose courante dans l'industrie. Notre laboratoire ne nous permet pas, pour l'instant, d'utiliser ces deux technologies, mais nous avons fait un grand pas en ce qui concerne la métallisation des trous.

Le concept que nous avons choisi est le même qui est utilisé en industrie, mais à une échelle réduite. Ce système est conçu pour réaliser des prototypes d'une grandeur maximum de 10" par 12" et d'un minimum de .¼" par ¼". Le perçage des trous se fait automatiquement et l'information concernant l'emplacement des trous doit être en format "GERBER".

Le système nous permet de réaliser toutes les étapes d'un procédé industriel comme la métallisation des trous, la fabrication du "solder mask" et "silkscreen", ainsi que le plaquage des doigts de connecteur en or ou au nickel.

Voici un sommaire des opérations effectuées pour la réalisation d'une plaque:

1) Réalisation du "ARTWORK" avec un système DAO (ex: PCAD, EE DESIGNER, Sm ARTWORK, etc.)
2) Impression des "ARTWORK" en double grandeur
3) Fabrication d'un film positif (fait à l'extérieur)
4) Découpage d'une plaque de cuivre et perçage automatique
5) Pré-plaquage (étape permettant de déposer un mince film métallique sur les parties isolantes)
6) Lamination du film photosensible sur la plaque
7) Exposition des positifs sur la plaque et développement du film photosensible
8) Plaquage de la plaque au cuivre (métallisation des trous)
9) Plaquage de la plaque au plomb/étain (ceci permettra de protéger le métal que l'on veut garder lors de la gravure)
10) Élimination de ce qui reste du film photosensible sur la plaque (STRIPPING)
11) Gravure de la plaque
12) Fabrication du masque de soudure et impression par sérigraphie

Ces explications sont évidemment très superficielles et n'ont pour but que de vous illustrer le procédé.

Pour conclure, nous pouvons maintenant réaliser des circuits imprimés, simple ou double côté avec métallisation des trous. Ceci aura pour effet de produire des plaques d'une qualité industrielle à

des coûts intéressants et surtout dans des délais qui tiennent compte de notre réalité.

Avec l'automatisation d'une partie du procédé et l'acquisition d'un photo-traceur, nous pourrons un jour réaliser en 24 heures ce qui prenait des semaines il y a quelques temps.

Le Collège Lionel-Groulx et l'Institut d'Ordinique ont innové dans ce secteur d'activité en perpétuelle croissance au Québec.

Cette méthode est sûrement la plus compliquée et la plus coûteuse. Il ne faut toutefois pas oublier que la qualité du produit fini n'est pas comparable à celle des circuits imprimés sans métallisation. Il nous apparaît important de parler de ce procédé car il sera bientôt très répandu, surtout à cause des besoins de plus en plus précis en ce qui concerne la qualité. Évidemment, ce procédé nécessite beaucoup plus d'équipements spécialisés ainsi qu'une bonne connaissance du procédé.

Lors de notre expérimentation, nous avons tenté, dans un premier temps, de trouver différents manufacturiers pouvant nous fournir des équipements à des prix abordables et construits dans le but de réaliser des prototypes. (Pas plus de dix à vingt exemplaires du même circuit). Il existe possiblement différents procédés nous permettant de réaliser la métallisation des trous. Nous avons donc visité quelques industries afin de vérifier le

procédé le plus utilisé et ce, dans le but de travailler avec un procédé qui a vraiment été éprouvé et qui pourrait être un standard. Nous n'avons donc choisi un procédé, qui est très populaire, pour la fabrication de prototype et pour la réalisation de production. La seule chose qui diffère est la dimension des bassins servant à la réalisation. Donc, après avoir bien identifié ce procédé, nous avons décidé de chercher un manufacturier pouvant répondre à nos besoins. Il n'y avait pas beaucoup de manufacturiers pouvant nous fournir ce type de matériel à dimensions réduites et à coûts réduits, car la plus part des compagnies bâtissent leur propre équipement pour la fabrication de prototype. Deux compagnies nous offraient par contre des équipements intéressants. La première, une firme anglaise, avait le désavantage de ne pas disposer de système en opération en Amérique, ce qui signifiait pour nous l'absence d'expertise locale. Comme il s'agit d'un procédé passablement nouveau en éducation et que l'expertise se trouve en entreprise, nous avons opté pour une compagnie manufacturière canadienne située en Ontario, près de Hamilton. Cette compagnie utilise cet équipement pour son département de fabrication de prototype et nous avons pu visiter et regarder le procédé en pleine action. Grâce à leur expertise, nous avons identifié nos besoins, évalué comment nos équipements existants pouvaient être réutilisés et estimé l'aménagement physique nécessaire pour une opération efficace. Pour en faciliter la compréhension, nous expliquerons le procédé avec l'équipement acquis par le Cégep Lionel-Groulx. Notons que ce laboratoire a pour objectif de servir les départements de tech-

nologie des systèmes ordinés (Institut d'ordinique du Québec) et d'électrotechnique.

Regardons d'abord les étapes d"aménagement et de réalisation du laboratoire, puis le procédé utilisé.

1.0 Réalisation du laboratoire

On doit, dans cette partie, déterminer les différents emplacements physiques constituant notre laboratoire et leur utilisation respective. Trois locaux différents mais adjacents serviront:

a) Laboratoire 1: Surface sèche servant pour ordinateur, perçage, table lumineuse, sérigraphie (éclairage normal).

b) Laboratoire 2: Surface chimique servant au plaquage et à la gravure (éclairage normal).

c) Laboratoire 3: Surface chimique servant au laminateur, développeur du film photosensible et système d'exposition (éclairage filtré).

Voici un plan d'aménagement:

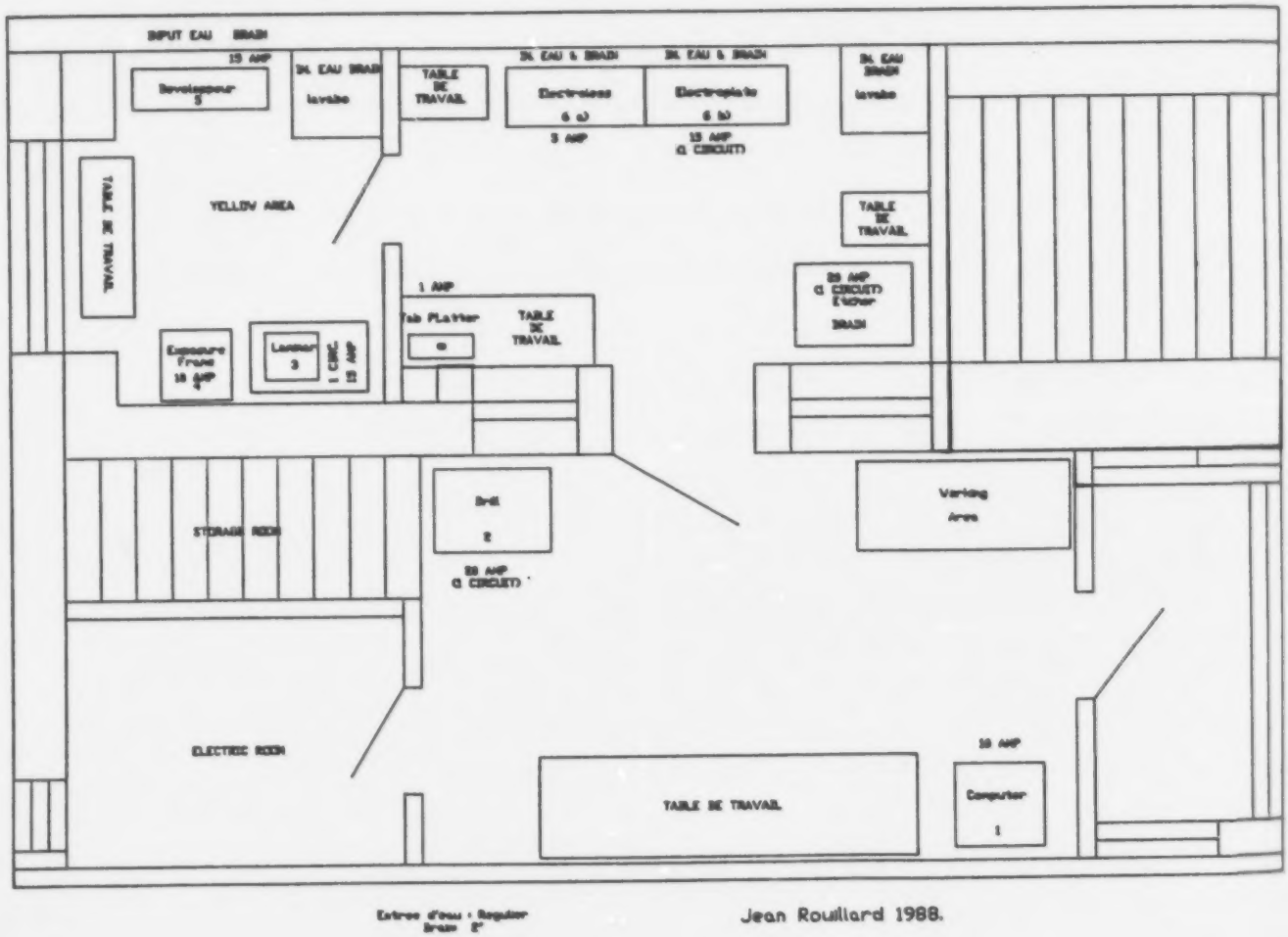


Fig. 11: Exemple d'aménagement d'un laboratoire de fabrication de circuits imprimés

Lorsque l'aménagement est terminé, il nous reste à installer l'électricité et la plomberie. Cette étape consiste à bien répartir les prises de courant, les entrées d'eau ainsi que les différents drains servant au rejet des eaux de rinçage. Attention, ces drains ne devraient pas servir à jeter les acides usés utilisés dans le procédé. Ces acides usés devront être disposés avec beaucoup de précaution. Vous aurez besoin pour le laboratoire 3, d'un éclairage filtrant les ultraviolets afin de protéger le film photosensible avant exposition.

Finalement, l'étape la plus importante est la sécurité. En collaboration avec le programme d'hygiène industrielle et le département de chimie, nous avons instauré un programme de formation destiné aux utilisateurs ainsi que des équipements de sécurité nécessaires à ce type de laboratoire. Nous croyons que cette étape ne doit pas être négligée. Nous devrons aussi trouver un endroit pour entreposer les différents produits chimiques.

Une ventilation adéquate complétera l'aménagement de notre laboratoire.

2.0 Le procédé

Comme nous le mentionnions précédemment, ce procédé est très utilisé en industrie. Nous emploierons les équipements et produits chimiques distribués par la Compagnie TEKTRON - EQUIPMENT CORP. S'il arrive que certains mots soient écrits en anglais, c'est uniquement dans le but de préserver le sens fondamental des termes techniques qui seraient difficiles à traduire fidèlement en français.

2.1 Préparation de la plaque

La première étape consiste à découper votre plaque de cuivre à la grandeur désirée tout en ajoutant une bordure d'un pouce autour.

2.2 Perçage de la plaque

Cette étape consiste à percer des trous dans la plaque avant le traçage des conducteurs; cette partie peut être faite à la main ou à l'aide d'une perceuse contrôlée par ordinateur. Il est par contre conseillé d'utiliser une perceuse automatisée car elle est très précise (1/10000 de pouce) et beaucoup plus rapide. A ce stade, il est préférable d'utiliser des mèches au carbure bien

affûtées, ceci nous évitera d'avoir des trous défoncés (les bavures sur les rebords ne permettront pas un plaquage de qualité). Dans le cas où la surface du dessous ne serait pas lisse (à cause des bavures), on pourra utiliser un papier sablé numéro 180.

2.3 Plaquage de la plaque au cuivre

Cette étape se divise en plusieurs parties. D'abord, on devra nettoyer notre plaque pour enlever toute forme d'oxydation.

I) Utiliser le "PUMICE SCRUB" (il s'agit d'un abrasif spécial) avec de l'eau, appliquer sur la plaque et frotter avec une petite brosse. Bien rincer la plaque afin d'éviter de contaminer le premier bassin. Ceci aura pour effet de donner une surface douce et propre.

II) Electroless plating: cette étape est primordiale pour la métallisation des trous. Elle consiste à préparer toutes les parties non-métalliques à recevoir une mince pellicule de cuivre qui permettra, un peu plus tard, un plaquage plus épais. Notre système nous limite à des plaques de 12 pouces par 12 pouces, quatre à la fois. Par contre, on doit prévoir tout de suite le maximum que peut accepter le système d'électro-plaquage. Ce maximum est appelé LSF maximum (load square

feet maximum) et ne doit pas dépasser 4.5 pieds carrés. La formule suivante nous permet de faire le calcul.

LSF = longueur (pied) x largeur (pied) x 2 côtés x nbre de plaques

Il est très important de comptabiliser ces surfaces à chaque fois car ces calculs nous aideront à maintenir nos produits chimiques en bon état. A partir de cette étape, il est primordial de ne jamais toucher le circuit avec les doigts car ceci aurait pour effet d'ajouter des corps étrangers qui pourraient gâcher votre oeuvre.

Avant de commencer avec le premier bassin, vous devez toujours vérifier:

a) Les températures des produits.
b) Si les eaux s'écoulent continuellement dans les bassins de rinçage.

Nous sommes alors prêts à passer aux quatorze étapes de préplaquage.

	Procédé	Temps	Instructions
1)	Alkaline Soap Cleaner	4 minutes	Agiter 2 à 3 fois
2)	Rinçage	20 secondes	Voir note [1]
3)	Micro-etch	2.5 minutes	Agiter lentement de haut en bas. Le cuivre sur le circuit doit être de couleur rose et l'eau ne doit pas rester sur le circuit. Si ça ne fonctionne pas, recommencer au point 1.
4)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
5)	ACID DIP	2 minutes	Agiter lentement de 3 à 5 fois
6)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
7)	PREDIP	2 minutes	Agiter lentement de haut en bas
8)	ACTIVATOR	6 minutes	Agitation latérale constante. Les trous doivent devenir bruns
9)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
10)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
11)	ACCELERATOR	2.5 minutes	Agiter lentement de haut en bas. Attention le temps est très important et ne doit pas être dépassé. Voir note 1
12)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
13)	ELECTROLESS COOPER	30 minutes	La solution doit être bleu clair. Les trous doivent être recouverts de cuivre
14)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1

1 Agiter vigoureusement de haut en bas.

Pour obtenir un meilleur résultat, il est recommandé de plaquer au cuivre votre plaque afin de protéger l'"Electroless copper" durant les étapes de lamination et d'exposition.

	Procédé	Temps	Instructions (suite)
15)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
16)	ACID DIP	20 secondes	Agiter lentement de haut en bas
17)	ELECTROPLATE COPPER brillant	5 minutes	@ 17 ASF. Le circuit doit avoir un fini
18)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1

ASF veut dire "Amps per square foot" ou courant par pied carré. Ce calcul doit se faire pour avoir un plaquage idéal. Regardons à quoi correspondent ces calculs.

D'abord l'épaisseur du plaquage dépend de la densité du courant et du temps d'exposition. Pour atteindre un bon résultat, il faut choisir l'équilibre entre ces deux paramètres. Le procédé recommande les conditions suivantes.

Solution de plaquage	Valeurs permises	Valeurs recommandées
ELECTROPLATE COPPER	6 à 30 ASF	25 ASF pendant 30 minutes
ELECTROPLATE + TIN/LEAD	10 à 30 ASF	20 ASF pendant 20 minutes

Regardons un exemple:

Si nous avons une plaque représentant 2.5 pieds carrés que nous voulons plaquer en cuivre à 25 ASF alors:

$$2.5\ pi^2 \times 25\ \frac{amps}{pi^2} = 62.5 \text{ ampères pendant 30 minutes}$$

Cette même plaque pour l'étape 17 nécessiterait le calcul suivant:

$$2.5\ pi^2 \times 17\ \frac{amps}{pi^2} = 42.5 \text{ ampères pendant 5 minutes}$$

A présent, nous avons une plaque dont les surfaces du dessous et du dessus sont électriquement reliées par l'intérieur de chacun des trous. L'étape suivante consiste à préparer la plaque dans le but de lui imprimer le positif de votre "ARTWORK". Dans un premier temps, vous devrez frotter vigoureusement la plaque afin d'enlever toute matière étrangère sur le cuivre, la rincer puis la sécher complètement.

3.0 Lamination et exposition

Cette partie du procédé consiste à recouvrir votre plaque d'un film photosensible aux rayons ultraviolets. Par la suite, vous devez bien aligner vos positifs au dessus des trous. Il ne faut pas oublier que votre exposition sur film photosensible ne peut être de meilleure qualité que votre positif. Il faudra peut-être, dans certains cas, faire des retouches sur votre film. Ici, nous utiliserons un système d'exposition vendu par la Compagnie TEKTRON (TEC-2005). Voici les étapes à suivre:

1) Couper votre film de façon à ce qu'il soit plus petit que votre plaque de cuivre (précédemment on vous avait avisé de laisser un pouce de plus que le dessin).

2) Ouvrir le tiroir puis placer les plaques et films au centre, sur la base vitrée. Refermer le tiroir.

   Attention, le positif doit être appliqué de façon à ce que le côté émulsion du positif soit sur la plaque.

3) Mettre le système en marche pour faire le vide. Vous devrez probablement mettre une pression sur le devant du tiroir. Le vide se fait lorsque la membrane de plastique moule parfaite-

ment la plaque. Repoussez le tiroir pour l'exposition de la plaque.

4) Revérifier si l'alignement du film sur la plaque est maintenu.

5) Sélectionner les interrupteurs pour les lampes dans la position de fonctionnement ON.

6) Ajuster la minuterie à la valeur requise et l'exposition démarrera. Après un certain temps, l'éclairage s'arrêtera automatiquement lorsque le délai sera complété.

7) Retirer la plaque et laisser reposer quinze minutes afin que le film photosensible se stabilise.

Voici un tableau donnant les temps d'exposition en rapport avec les différentes pellicules photosensibles.

Substance photosensible	Temps d'exposition
Liquide photosensible	30 à 40 secondes
Pellicule 1.5 millième	45 à 60 secondes
Film négatif	4 à 5 minutes
Film diazo (pour sérigraphie)	3 à 4 minutes

L'étape suivante consiste à développer votre plaque pour laisser apparaître le cuivre aux endroits que vous voulez garder. Pour cette partie du procédé nous utiliserons le développeur de la Compagnie TEKTRON (TEC-2001).

Premièrement, on doit s'assurer que le liquide pour développer est en place et en quantité suffisante. Prendre la plaque et enlever le plastique protecteur sur les surfaces. Installer la plaque sur la tige horizontale. Le temps de développement varie beaucoup en fonction de la qualité de la solution. Insérer la plaque dans l'espace de développement. Démarrer la pompe en ajustant la minuterie pour trois minutes environ (solution neuve), le jet s'arrêtera automatiquement après ce délai. Regarder si le cuivre est débarrassé complètement de la pellicule (là où le cuivre doit rester évidemment), puis rincer dans le compartiment suivant pendant dix secondes. Finalement, faire sécher la plaque comme il le faut dans le dernier compartiment.

L'étape suivante consiste à bien examiner si des retouches sont nécessaires. S'il y a lieu, gratter ou utiliser le crayon à encre spéciale pour corriger les imperfections du masque photosensible. A ce stade, on doit protéger la partie de cuivre que l'on ne veut pas plaquer avec le cuivre et le plomb/étain. Nous sommes donc prêts à passer à l'étape de plaquage.

4.0 Électro-plaquage cuivre et plomb/étain

Nous procéderons maintenant aux étapes de plaquage. Nous plaquerons les surfaces libres de la pellicule de film photosensible. Voici donc les étapes:

	Procédé	Temps	Instructions
1)	Acid Soap Cleaner	4 minutes	Agiter doucement de en bas
2)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
3)	Micro-etch	1 à 2 minutes	Agitation constante de haut en bas. Le cuivre doit avoir une couleur rosée
4)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
5)	Acide sulfurique	20 secondes	Agiter doucement de haut en bas
6)	ELECTROPLATE COPPER	25 minutes	@25 ASF. Le cuivre sur le circuit doit être brillant
7)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1
8)	Acide fluoborique	20 secondes	Agiter doucement de haut en bas
9)	ELECTROPLATE TIN/LEAD	12 minutes	Agiter régulièrement de l'avant vers l'arrière. Plaquer à 10 ASF. La plaque doit devenir gris pâle
10)	Rinçage	20 secondes	Voir note 1

L'opération de plaquage est maintenant terminée. Vous devez enlever à présent le film photosensible qui servait à préserver une partie du circuit pour le plaquage. On utilise, pour ce procédé, du "stripper".

5.0 La gravure (Etching)

Le plaquage à l'étain nous servira maintenant de protecteur car nous voulons enlever le cuivre qui était protégé par le film photosensible. Pour cette séquence, nous tremperons la plaque dans la solution de gravure (persulfate de sodium ou chlorure de fer). Un système à jet de liquide est recommandé car la solution se sature lorsqu'elle est stagnante sur le cuivre. Ce système nécessite par contre l'utilisation d'une assez grande quantité de liquide. Le temps d'opération dépend évidemment de la qualité de la solution. Nous utiliserons une solution contenant du persulfate de sodium car ce dernier est moins cher et peut graver une plus grande quantité de cuivre. Il faut, toutefois, ne pas surgraver la plaque. En effet, si on excède le temps de gravure, il peut arriver que de petits conducteurs soient coupés par une gravure latérale. Lorsque nous aurons terminé cette opération, le circuit sera opérationnel. Par contre, quelques étapes supplémentaires nous permettront de réaliser un produit qui sera d'une qualité professionnelle. Donc, dépendant de l'utilité de votre circuit, on passera à d'autres étapes.

6.0 "Silkscreen" et "Solder mask"

Bien que ces opérations ne changent pas le fonctionnement du circuit, elles peuvent être fort importantes si on désire prolonger la longévité de notre circuit. L'oxydation causée par l'air est un facteur majeur qui altère la qualité du circuit. C'est pourquoi on a inventé le procédé de "solder mask". Ce procédé permet de déposer sur notre plaque un isolant qui empêchera l'air d'entrer en contact avec notre circuit. Sa particularité est de laisser les points de soudure intacts afin de ne pas interférer avec l'étape de soudure des composantes. Dans le cas où on utiliserait un bain de soudure, l'étape du "solder mask" serait essentielle. La méthode utilisée n'est pas révolutionnaire car il s'agit de sérigraphie. TEKTRON offre un équipement assez rudimentaire et facile à utiliser pour faire le "silkscreen" et le "solder mask". Voici comment on procède. D'abord, le procédé est divisé en deux parties, la préparation de la soie et l'impression des plaques.

6.1 Préparation de la soie

i) Nettoyage de la soie (dégraissage)

1) Rincer la soie avec de l'eau chaude.
2) Avec une éponge humide, appliquer le produit "TEKTRON UNIVERSAL SCREEN PREP" sur les deux côtés de la soie.

3) Attendre 2 minutes pour que la solution pénètre bien.

4) Rincer avec de l'eau chaude.

5) Faire sécher la soie avec un ventilateur.

ii) Fabrication du stencil (ces étapes doivent se réaliser sous un éclairage exempt d'ultraviolet)

1) Couper le photo-stencil un pouce plus grand que le film.

2) Placer le côté brillant du stencil vers le haut.

3) Appuyer le film sur le stencil (en respectant le côté lisible).

4) Exposer avec le système d'exposition (TEC-2005) pendant trois minutes.

5) Développer dans un plateau en disposant la surface brillante vers le bas. (La solution à utiliser est le "STENCIL DEVELOPPING SOLUTION").

6) Agiter pendant une minute (avec un mouvement de va-et-vient).

7) Rincer avec de l'eau à la température de la pièce jusqu'à ce que l'image apparaisse.

8) Placer le stencil dans l'eau froide pendant deux minutes.

9) Rincer à la température de la pièce.

iii) Transposition du stencil sur la soie

1) Déposer le stencil, le côté émulsion vers le haut, sur une surface légèrement inclinée.
2) Placer la soie sur le stencil.
3) Mouiller un papier essuie-main avec de l'eau froide et frotter légèrement la soie.
4) Éponger l'eau avec un papier journal jusqu'à ce que la soie devienne sèche.
5) Frotter légèrement avec un papier essuie-tout.
6) Retourner la soie et appliquer une couche mince de "Block-out" sur la soie autour du stencil (environ 1 pouce). Le "Block-out" a pour effet de masquer la soie.
7) Laisser sécher la soie avec un ventilateur pendant 20 minutes.
8) Enlever le film plastique qui recouvrait le stencil.
9) Vérifier si des retouches sont nécessaires (si oui, utiliser le "Block-out").
10) Laisser sécher pendant 20 minutes.

6.2 Impression de la plaque

La préparation de la plaque est la même dans le cas où on veut

imprimer du texte avec de l'encre ou encore faire le "solder mask". Nous vous indiquerons les différences lorsque cela sera nécessaire.

i) Montage de la soie.

1) D'abord, bien fixer le cadre contenant la soie avec les deux étaux.
2) Aligner le circuit de façon à ce qu'il corresponde au stencil.
3) Utiliser trois morceaux de circuits imprimés pour circonscrire les limites où sera déposée la plaque.
4) Bien fixer ces morceaux avec l'aide de rubans adhésifs. Le tout doit être bien fixe car les morceaux de circuits imprimés détermineront l'emplacement de la plaque lors de l'impression.
5) Vérifier avec une plaque si le tout est bien ajusté et faire la correction si nécessaire.

ii) Préparation de l'encre

Sérigraphie

1) Pour impression sérigraphique, mélanger l'encre et le catalyseur (catalyst) dans un rapport de quatre pour un. Bien mélanger.

2) Ajouter le "slow epoxy thinner" pour obtenir la consistance voulue (maximum 5%).

3) Appliquer l'encre sur la soie.

Solder mask

1) Même chose qu'avec la sérigraphie mais on n'ajoute rien.

2) Après avoir imprimé la plaque, la faire cuire à 350°F pendant 45 à 60 minutes. Le four doit être ventilé.

iii) Impression des plaques

1) Étendre l'encre sur la soie à l'aide d'un balai de caoutchouc sans plaque afin de saturer la soie.

2) Abaisser la soie sur une plaque et étendre l'encre à l'aide du balai de caoutchouc. Pour un bon rendement, il suffit de tenir le balai à angle de 60 degrés.

3) Remonter la soie et enlever la plaque.

4) Vérifier si la plaque est bien faite et faire sécher à l'air libre ou cuire dans le cas de "solder mask".

iv) Nettoyage de la soie

1) Pour nettoyer la soie tout en préservant le stencil, utiliser le produit "wash-up solutions" avec un papier essuie-tout.
2) Essuyer l'encre jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement.
3) Garder toujours la soie dans un endroit propre et exempt de poussière.

v) Pour enlever le stencil

1) Utiliser le "stencil stripper" et frotter avec un pinceau jusqu'à ce que le stencil et le "block-out" disparaissent.
2) Rincer à l'eau chaude.

Voici donc les étapes qui vous permettront de réaliser un circuit imprimé avec métallisation des trous de qualité industrielle. Vous trouverez peut-être le procédé laborieux, mais à moyen terme, vous ne regretterez pas cette partie du travail.

7.0 L'entretien du système

7.1 Les produits chimiques

Après l'utilisation des produits, une certaine dégradation se produit, nous devrons donc ajouter certains additifs au début de chaque session. Pour connaître les quantités à ajouter, on devra comptabiliser le travail effectué lors de la dernière session de travail. Ces calculs doivent être faits avec la plus grande rigueur possible. Une erreur peut entraîner la contamination du procédé au complet. Vous trouverez, à l'annexe I, un exemple de guide vous permettant de bien suivre la qualité de vos produits chimiques.

1) La solution de développement de film photosensible.

Disons que 38 litres de solution peuvent développer 200 pieds carrés de circuits imprimés. On notera à chaque plaque la surface multipliée par le nombre de faces. Cette solution n'est pas réutilisable après la dégradation et aucun additif ne doit être ajouté.

2) Electroless plating

Bassin #1 - CLEANER (9267)

Il s'agit d'un nettoyeur alcalin doux utilisé pour éliminer les saletés organiques qui ont pu être introduites lors du perçage. Cette étape est essentielle afin que les parois des trous soient uniformes. Cette substance ne contient pas de "silicate", de "chromate" ou de "phosphate".

Il n'y a aucun additif. On ajoute de l'eau distillée lorsque la solution baisse et on doit la changer lorsqu'on atteint 200 à 300 pieds carrés.

On peut jeter la solution dans les égouts en la diluant avec de l'eau.

Bassin #3 - Micro-ETCH (G2)

Ce produit à base de persulfate servira à graver en surface le cuivre pour enlever l'oxydation et autres impuretés. Il ne contient pas de chromate. Cette étape sert à graver une couche très mince de cuivre tout en laissant la surface rugueuse. Ceci aura pour effet de favoriser l'adhérence au moment du plaquage.

Ce produit ne requiert aucun additif. Si le niveau baisse, on ajoute de l'eau distillée. Ce produit est bon pour 70 à 100 pieds carrés. Lorsque le produit est périmé, on ajoute du "soda caustic" pour ramener le PH à 7-9, puis on peut le jeter aux égouts.

Bassin #5 - ACID TREAT (AD)

Ce produit est de l'acide sulfurique dilué. Son utilité est de préparer la surface de cuivre au plaquage. Si le niveau de la solution baisse on ajoute de l'eau distillée. Après 200 pieds carrés la solution doit être changée. Pour le neutraliser, il faut ajouter de l'hydroxyde de sodium. On peut jeter dans l'égout.

Bassin #7 - PREDIP (9008)

Cette surface prépare la plaque à accepter le prochain produit (ACTIVATOR). Elle prévient la déstabilisation du "ACTIVATOR" en empêchant que de l'eau s'introduise dans cette dernière (c'est pourquoi, il n'y a pas de bassin de rinçage entre ces deux solutions). Ce produit est un acide que l'on doit manipuler avec beaucoup de soin.

A chaque session de travail, on doit ajouter un additif qui reconditionnera la solution. Le dosage est de 9.5 ml par pied carré.

Lorsqu'on veut se débarrasser de la solution, on doit la remettre dans son contenant et amener le PH à 7 en ajoutant de l'hydroxyde de sodium. On filtre la solution et on peut jeter dans les égouts. Il ne faut jamais la neutraliser dans le bassin.

Bassin #8 - ACTIVATOR (9070)

Il s'agit d'un catalyseur qui favorise le dépôt de la solution "Electroless copper" sur les surfaces non-métalliques. La solution brun foncé contient un métal dissous qui adhérera à toute surface adéquatement préparée. Cette solution est onéreuse et très instable. Il est très important d'y apporter les soins nécessaires afin d'éviter la contamination ou "métal fall-out".

A mesure que le métal disparaît dans la solution, on peut compenser en ajoutant le concentré (9070A) en quantité de 0.63 ml par pied carré et ce, toujours au début de chaque session.

Si de petites taches argentées apparaissent sur le dessus de la solution, il faut ajouter 2.5 ml de L50 immédiatement. Si les conditions ne s'améliorent pas, rajouter du L50 jusqu'à un maximum de 7.5 ml. Trop de L50 déstabilisera le produit et le rendra inutilisable.

Pour se débarrasser du "ACTIVATOR" on doit amener le PH à 8 en ajoutant de l'hydroxyde de sodium. Attention, cette réaction est très exothermique, elle produit de la chaleur. Ajouter l'hydroxyde lentement. Laisser les matières solides se déposer au fond puis jeter dans les égouts.

Bassin #11 - ACCELERATOR (ACC)

Cette solution très stable prépare la plaque pour un dépôt rapide de cuivre.

On ajoute à chaque session 2 ml du produit (ACC) pour chaque pied carré de circuit. Le produit doit être changé complètement lorsque la couleur est vert pâle ou bleue.

Pour jeter la solution, on la neutralise en ajoutant lentement de l'hydroxyde de sodium. Puis on peut la jeter dans les égouts.

Bassin #13 - ELECTROLESS COPPER (9072)

Ce produit déposera un film de cuivre partout sur la plaque. On doit fermer le chauffe-liquide lorsque le système n'est pas en fonction, mais le système de bulles doit être constamment en opération.

Pour entretenir le produit, on doit à chaque session ajouter pour chaque pied carré, 8.5 ml de concentré 9072A et 7.5 ml de réducteur 9073A.

Si la solution dépose des cernes sur les parois du bassin, il faut alors la changer. Vider le bassin et l'emplir avec du

persulfate de sodium réduit. Laisser la solution tremper une nuit dans le bassin, jeter la solution et rincer à l'eau claire.

La solution peut être neutralisée en ajoutant de l'hydroxyde de sodium lentement (réaction exothermique) jusqu'à un PH égal à 8. Laisser la solution décanter puis jeter le liquide dans les égouts.

3) Electroplating

Bassin #1 - CLEANER (9268)

Ce nettoyeur à base d'acide est utilisé après le développement de la pellicule photosensible. Il est parfaitement désigné pour éliminer les corps gras, les saletés, l'oxydation, les traces de doigts et les déchets laissés par le film photosensible.

Avec le temps, la solution prendra la couleur du film photosensible. Ajouter de l'eau distillée si la solution baisse.

Après 200 pieds carrés d'utilisation la solution doit être changée. On s'en débarrasse en ajoutant de l'hydroxyde de sodium.

Bassin #3 - MICRO-ETCH (G2)

Même produit que bassin #3 dans electroless plating.

Bassin #5 - ACID TREAT (AD)

Même produit que bassin #5 dans electroless plating.

Bassin #6 - ELECTROPLATE COPPER (EPC)

Cette solution à base d'acide favorise le dépôt de cuivre venant des anodes de cuivre. Ce produit permettra le dépôt d'une masse de cuivre importante sur notre plaque.

Pour avoir de bons résultats, on ajoute 0.25 ml de solution 9241A pour chaque ampère-heure de plaquage. Cette solution empêchera le cuivre de brûler et lui donnera un fini brillant. La solution doit être filtrée au moins une fois par semaine pour éviter une contamination de type organique.

Pour neutraliser la solution on ajoute de l'hydroxyde de sodium, on laisse décanter puis on jette le liquide dans les égouts.

Bassin #8 - ACID TREAT (FA)

Cette solution est de l'acide fluoboric dilué qui sert à préparer le plaquage à l'étain.

Le produit est bon pour une quantité de 200 pieds carrés de plaque. On neutralise avec de l'hydroxyde de sodium puis on peut jeter dans les égouts.

Bassin #9 - ELECTROPLATE TIN/LEAD

Ce produit donne un plaquage étain/plomb dans un rapport 60/40. Deux produits sont nécessaires pour maintenir la solution à un bon niveau d'opération. Le "stabilizer 9255" que l'on dissout lorsque nécessaire et le "Replenisher 9257" qu'on ajoute en quantité de 15 ml par 100 ampères/heure d'utilisation. Le filtrage doit se faire à chaque jour afin d'éviter toutes formes de contamination organique.

Pour se débarrasser de la solution on ajoute de l'hydroxyde de sodium puis on jette le liquide dans les égouts.

7.2 Quelques conseils pratiques

Quelques petites choses à surveiller concernant le plaquage.

1) Toujours laisser une marge d'un pouce entre votre plaque et les parois du bassin.

2) Essayer le plus possible de faire le trou de support au centre de la plaque.

3) S'il arrive qu'un circuit est très dense sur un côté et peu de l'autre, il est possible que ce débalancement ne favorise pas un bon plaquage. On peut corriger la situation en ajoutant une bordure sur le côte pauvre ou en diminuant le courant de plaquage et en augmentant le temps.

Ex: Notre circuit nécessite un plaquage à 30 ASF pendant une demi-heure. Afin d'assurer un plaquage moins intensif et d'éliminer la possibilité de brûler des conducteurs très minces, il serait toutefois préférable de plaquer à 15 ASF pendant une heure.

4) Si les plaques sont suffisamment petites pour être placées ensemble, on s'organisera pour que les surfaces identiques soient face à face. Ceci dans le but d'avoir la même surface vue d'un côté ou de l'autre.

5) Si les plaques contiennent beaucoup de petites lignes, il est préférable de laisser une bordure de cuivre assez large.

6) Si après la micro-gravure (Bassin #3: ELECTROPLATING) il y a des surfaces ternes et que le cuivre n'est pas uniformément rose, <u>arrêter le procédé: rien ne sert de continuer.</u> Ceci est

dû à des résidus de film photosensible causés par un sous-développement du film photosensible.

7) Il est capital que les mains ou les gants soient bien rincés avant de manipuler les plaques venant de la solution de plaquage à l'étain (Bassin #9: ELECTROPLATING). Des résidus de solution "ELECTROPLATING COPPER" peuvent tacher la plaque.

Il faut aussi apporter des soins aux différents bassins. Voici quelques points à surveiller.

L'entretien des bassins est essentiel pour obtenir des résultats de très bonne qualité. Comme il s'agit d'un procédé, chaque maillon de la chaîne est aussi important et chaque bassin doit être considéré au même niveau. La comptabilisation du travail effectué représente la survie du procédé. Il faudra changer, recycler et bien suivre le comportement de chaque produit chimique.

Chaque fois que la plaque transfère d'un bassin à un autre, elle transporte une partie du liquide du bassin précédent. Dans le but de réduire cette quantité de liquide qui correspond à environ 5 à 8 ml par pied carré, on laissera égoutter la plaque pendant 5 à 10 secondes. Ceci aura pour effet de réduire ce problème d'environ 80%. La conséquence immédiate de ce problème se répercute de deux façons. Premièrement, l'eau de rinçage s'insère dans le produit en le contaminant, puis ce même bain contamine à son tour le bassin de

rinçage suivant. Même si les quantités sont minimes, l'effet est plus important à long terme, ce qui résultera en une qualité moindre.

Comme on le disait plus tôt, il faut tenir compte de l'épuisement des solutions. La dégradation doit être suivie de façon à ajouter les éléments nécessaires aux différents produits chimiques. On devra avoir un registre de la surface travaillée ou du courant par surface travaillée.

8.0 Plaquage des connecteurs

Le plaquage des doigts de connecteurs était une opération que l'on négligeait souvent. Il est pourtant important de s'assurer de la qualité de cette étape car elle détermine en partie la durée de vie du circuit.

La conception modulaire qui semble devenir la méthode de l'avenir entraînera l'usage accru de ce type de connecteur. On aura donc avantage à s'équiper d'un bon système qui nous permettra d'ajouter un mince plaquage d'or ou de nickel. Ces deux métaux ont des qualités exceptionnelles en ce qui a trait à l'oxydation. Le cuivre et l'étain sont plutôt médiocres.

Regardons le procédé nous permettant de plaquer les doigts de connecteurs. Avant le plaquage, certaines dispositions doivent être prises lors de la réalisation du "ARTWORK". Pour obtenir un plaquage uniforme, tous les doigts doivent être reliés électriquement par une bande de cuivre de 1/3" à 1/4" de large. Cette bande devra être coupée lorsque le plaquage sera complété. De plus, s'il s'agit d'un circuit à double face, une connexion électrique devra être prévue entre les deux faces. Un ruban adhésif spécial permettra de masquer les endroits que vous ne voulez pas plaquer. Pour éviter que le liquide s'infiltre sous le ruban, il est recommandé de chauffer la plaque avant d'appliquer le ruban. Il faut aussi s'assurer que le plaquage plomb/étain soit complètement

enlevé. Une solution spéciale nous permet d'éliminer l'étain. Par la suite, on frottera la partie à plaquer pour avoir une surface fraîche.

Avant de plaquer, il faut, comme dans le cas du plaquage au cuivre, calculer le courant nécessaire en fonction de la surface à plaquer. On recommande un courant de 50 milliampères par pouce carré. On calcule alors la surface à plaquer, puis on ajuste le courant pour une durée de dix minutes. Ceci nous donnera un plaquage d'environ 50 millionième de pouce. Prenons un exemple:

Ex: Un connecteur occupe environ 3 pouces carrés

3 pouces^2 x 50 mA = 150 mA pour 10 minutes

Encore une fois, il faut s'assurer de bien comptabiliser le temps et le courant, car ceci nous donnera l'état de notre solution. Notre solution d'or (1 litre) peut plaquer jusqu'à 200 ampères-minute. Si nous augmentons le temps de plaquage, on obtiendra alors un plaquage plus épais. Si la solution diminue, on peut ajouter de l'eau distillée ou d'autres solutions de plaquage.

Le principe du plaquage consiste à faire passer un courant électrique par notre surface à plaquer. Cette dernière baigne dans une solution catalyseur dans laquelle se trouve l'or qui viendra plaquer notre cuivre. Il faut donc s'assurer que la cathode soit bien branchée à la surface de cuivre que l'on veut plaquer.

Ensuite, on met en route le système en programmant le temps et le courant nécessaires. Le système s'arrêtera automatiquement lorsque le temps se sera écoulé. On retire alors la plaque et on la rince immédiatement. On enlève le ruban de plaquage et on nettoie la surface plaquée. On coupe les parties de la plaque qui n'étaient nécessaires que pour le plaquage et c'est terminé.

Dans le cas du plaquage au nickel, il y a quelques petites différences. Le principal avantage du nickel est qu'il coûte beaucoup moins cher que l'or. Donc, si ce connecteur occupe une grande surface, il est préférable de plaquer au nickel.

L'autre différence réside dans le fait que les ions de nickel proviennent d'un anode solide contrairement à la solution d'or qui est dissoute dans un liquide. Ce changement fait en sorte que l'électrolyte[2] utilisé pour le nickel ne se modifie pas avec l'utilisation. Si la solution est contaminée après un certain temps, il est recommandé de la jeter et d'en remettre d'autre. Pour le nickel, on recommande un plaquage de 50 mA par pouce carré pendant quinze minutes, ceci nous donnera un plaquage d'une épaisseur de 100 millionième de pouce.

---

2 Un électrolyte est un liquide qui nous permet de transporter des ions de matériaux solides à l'aide d'un courant électrique.

CONCLUSION

Cette recherche nous a permis de remettre en question certaines pratiques que l'on a adoptées en électrotechnique lors de la réalisation d'un projet en électrotechnique. Bien que l'électronique soit une science qui évolue très rapidement, la démarche demeure passablement stable. Au départ, nous voulions détailler cette démarche en expliquant le fonctionnement de certains outils de travail. Mais l'évolution technologique de ces mêmes outils nous a fait réaliser que l'environnement doit être justement indépendant. Nous avons de plus constaté que chaque département avait des objectifs très différents en ce qui concerne ses orientations. L'utilisation d'un outil pour un professeur ne sera pas aussi essentielle pour un autre. Nous avons donc décidé d'insister sur la démarche plutôt que des outils.

Ceci ne nous a pas empêchés de produire des explications très détaillées sur certains procédés qui, jusqu'à maintenant, étaient peu documentés (voir partie sur le laboratoire de circuits imprimés). Les objectifs de départ furent donc modifiés afin de répondre à cette nouvelle problématique.

Ce qui nous a amenés à proposer une démarche type qui servira de guide pour ceux qui désireront créer leur propre environnement pour le développement d'un projet.

La section consacrée à la fabrication de circuits imprimés sera d'autant plus intéressante puisqu'elle est l'aboutissement d'un procédé concret que l'on a développé en collaboration avec l'industrie pour les besoins bien précis qu'exigent l'enseignement et

la recherche dans le milieu collégial. Il pourrait aussi être très souhaitable qu'on utilise cette recherche dans le but d'approfondir certaines notions citées dans ce travail. Ce rapport se veut donc essentiellement un outil de travail qui permettra à son utilisateur de développer ou d'améliorer sa propre démarche afin de créer un environnement qui répondra à la réalité distincte de chaque individu.

Finalement, suite à ce travail, je voudrais faire quelques recommandations à l'endroit du ministère et de la coordination provinciale d'électrotechnique, à savoir:

_ Définir clairement le contenu des cours "Initiation aux Projets", "Projet I" et "Projet II".

_ Insister sur la relation étroite qui doit exister entre ces trois cours et fournir les outils nécessaires.

_ Intègrer dans le programme d'électrotechnique (243.00) la technologie de fabrication des circuits imprimés.

_ Donner à chaque département une allocation de ressources humaines afin de permettre le développement d'outils pédagogiques et/ou l'apprentissage de ces mêmes outils.

_ D'intégrer à la tâche d'un professeur en électrotechnique la recherche qui, présentement, est assumée par ce dernier sans aucune reconnaissance.

Je termine en soulignant ma satisfaction d'avoir pu concrètement réaliser un guide qui, je l'espère, aidera mes confrères et/ou consoeurs qui poursuivent un idéal dans leur enseignement.

BIBLIOGRAPHIE

- LINDSEY, Darryl THE DESIGN & DRAFTING OF PRINTED CIRCUITS, Westlake Village California: Bishop Graphics inc. 1984.

- États-Unis. Department of Defense (MIL-STD-275D) PRINTED WIRING FOR ELECTRONIC EQUIPMENT, Bishop graphics, cat no: 1003.

- INTEL, EMBEDDED CONTROLLER HANDBOOK, vol. I., Santa Clara California; Intel Litteratures, 1988.

- Visionics Corporation, EE Designer CAE/CAD Integrated Software, REFERENCE GUIDE, Sunnyvale California, 1987.

- Visionics Corporation, EE Designer CAE/CAD Integrated Software, USER'S GUIDE, Sunnyvale California, 1987.

- Visionics Corporation, EE Designer CAE/CAD Integrated Software, AUTOROUTER USER'S MANUAL, Sunnyvale California, 1987.

- Tektron Equipment Corp., OWNER'S MANUAL AND APPLICATION NOTES.

- ORCAD Systems Corporation, ORCAD SDT III USER'S GUIDE, Hillsboro Oregon, 1987, ver. 3.11.

- ORCAD Systems Corporation, ORCAD SDT III ADDENDUM, Hillsboro Oregon, 1988.

- Wintek Corp., PCB ARTWORK SOFTWARE REFERENCE MANUAL, Lafayette Indiana, 1984, 1985, 1986, 1987. Ver. 1.4 rev. 4.

- Wintek Corp., GERBER PHOTOPLOTTER UTILITY REFERENCE MANUAL, Lafayette Indiana, 1987. Ver. 1.3 rev. 4.

- Intel, PL/M-51 USER'S GUIDE FOR DOS SYSTEMS, Santa Clara California, 1986.

- TESSIER, Guy, ENVIRONNEMENT MULTI-ASSEMBLEUR TESG, Ste-Thérèse Québec: Les productions Lionel-Groulx, 1986.

- Avocet Systems Inc., AVSIM51 8051 FAMILY USER'S MANUAL, Rockport Maine, novembre 1986, ver. 1.2.

ANNEXE I

1) Identification

NOM : _____

NUMÉRO : _____

DATE : _____

2) Nbre de positif: _____ Nbre de trous: _____

3) SILKSCREEN: oui ☐ non ☐

4) SOLDER MASK: oui ☐ non ☐

5) Plaquage de doigt: oui ☐ non ☐ surface:____ pouces carrés

6) Surface de la plaque: _____ pieds carrés

7) Courant de préplaquage cuivre: _____ ampères @ 5 minutes

8) Courant de plaquage cuivre : _____ ampères @ 25 minutes

9) Courant de plaquage Tin/Lead : _____ ampères @ 12 minutes

Commentaires:

_____

_____

_____

ANNEXE I (suite)

ENTRETIEN PÉRIODIQUE DU SYSTEME

Date: _____

Technicien: _____

Électroless Plating	Solution (Qté)	Additif (Qté)
Bassin 1:	_____	_____
Bassin 3:	_____	_____
Bassin 5:	_____	_____
Bassin 7:	_____	_____
Bassin 8:	_____	_____
Bassin 11:	_____	_____
Bassin 13:	_____	_____
Bassin 16:	_____	_____
Bassin 17:	_____	_____

Electroplate		
Bassin 1:	_____	_____
Bassin 3:	_____	_____
Bassin 5:	_____	_____
Bassin 6:	_____	_____
Bassin 8:	_____	_____
Bassin 9:	_____	_____

LEXIQUE

Assembleur : Logiciel de bas niveau permettant de programmer le microprocesseur ou microcontrôleur. Sa particularité est qu'il permet d'avoir un contrôle complet des fonctions programmées.

ARTWORK : Le résultat du dessin nous permet de tracer les routes pour la fabrication du circuit imprimé. On retrouve ce dessin deux fois la grandeur normale dans la plupart des cas.

Buffer : Terme anglais qui signifie "TAMPON". On s'en sert lorsqu'un interface est nécessaire pour amplifier la puissance d'un signal.

BUS : Ce terme sert à désigner un groupe de signal ayant des fonctions similaires mais complémentaires. Ex: un "bus" de données. D0, D1, D2... etc.

CAO : Conception assistée par ordinateur. Ceci désigne un environnement nous permettant de construire un prototype ou une partie de celui-ci.

Crosstalking : On utilise ce terme pour désigner un problème en électronique qui consiste à mêler deux signaux involontairement. C'est un phénomène parasite.

DAO : Dessin assisté par ordinateur. Même chose que le CAO mais seulement au niveau du dessin.

Émulateur : Se dit d'un système qui remplace le fonctionnement du système original. On se sert d'émulateur lors du développement de prototype. Ex: Émulateur ROM: il s'agit d'un système à base de mémoire volatile qui sera plus rapide lors de l'expérimentation.

EPROM : Mémoire non-volatile qui peut être reprogrammée un certain nombre de fois et qui s'efface au moyen d'une source lumineuse ultra-violet.

Feedback : Contre-réaction. Système qui permet de comparer la référence et le feedback afin d'apporter une correction.

Gerber : Format standard qui représente le contenu du "ARTWORK". On se sert de ce standard pour communiquer avec les photo-plotter.

Masque : Constitué à partir d'un ARTWORK, il est divisé en deux parties: transparente et opaque.

Métallisation des trous : Étape nous permettant de déposer sur l'intérieur des trous une surface métallique. Notons que cette surface était préalablement isolante.

Microcontrôleur : C'est un microprocesseur employé pour des applications spécifiques.

Microprocesseur : C'est une composante qui s'occupera d'exécuter les programmes. Son rôle est de contrôler les différentes fonctions du système.

NC-DRILL : Format utilisé pour déterminer la grosseur et l'emplacement des trous lors de la fabrication de circuits imprimés. On retrouvait cette information principalement sur du papier perforé.

NETLIST : Information contenant la liste des connexions électriques se trouvant dans le dessin schématique. Cette information est de plus en plus utilisée à l'intérieur des logiciels de fabrication de "ARTWORK" soit pour en vérifier l'exactitude ou la fabrication automatique.

Périphérique : Équipement auxiliaire d'un système. Il sert à effectuer des tâches connexes. Ex: Unité de disque, imprimante, écran, etc...

Photo-plotter : Périphérique utilisé pour la fabrication des négatifs (ou positifs). L'ordinateur transmet l'information à ce périphérique qui sensibilisera une pellicule photographique.

Photosensible : Matière qui modifie sa structure lorsqu'exposée à la lumière. On l'utilise fréquemment dans le procédé de fabrication des circuits imprimés.

PLM : Langage de programmation de niveau intermédiaire. Tout comme l'assembleur, il est utile pour programmer un microprocesseur, par contre, il est beaucoup plus puissant.

Port série : Interface de communication servant à transmettre l'information d'une façon sérielle. Bien que ce système soit lent, il ne nécessite que peu de conducteurs.

Prototype : Étape qui se réalise avant la production. Modèle original d'un circuit électronique que l'on veut reproduire. C'est aussi l'étape de développement de notre système.

RAM : Mémoire volatile qui permet des changements simples. Utilisée fréquemment pour garder les données.

ROM : Mémoire non-volatile dans laquelle on garde la programmation (faite en assembleur ou PLM) utile à faire fonctionner le système.

Silkscreen : Un procédé qui nous permet avec l'aide de la sérigraphie de tracer sur le circuit imprimé l'information relative aux composantes.

Solder mask : Même procédé que le silkscreen mais il sert à appliquer une résine sur les deux surfaces sauf aux points de soudure. Ce procédé est essentiel si le soudage des composantes se fait à l'aide d'un bain de soudure.

Stripping : Opération qui consiste à enlever les résidus de film photosensible qui ont été durcis précédemment.

Système cible : Il s'agit d'un système utilisant un microprocesseur dont nous pouvons charger le programme avec l'aide d'un port série. Ce système sert à simuler ou à essayer différentes fonctions que l'on veut appliquer à un système dédié.

Utilitaire : On l'appelle aussi programme auxiliaire. Il s'agit d'un logiciel qui sert à ajouter une fonction au programme principal. Ex: avec ORCAD "draft" est le logiciel pour dessiner et "erc" est un utilitaire nous permettant de vérifier certaines lois électriques.

QUESTIONNAIRE

La démarche

1_ Quelles sont les étapes importantes dans la réalisation d'un projet en électrotechnique?

Rép: p.4

2_ Si on doit concevoir un système portatif, quels sont les critères à respecter?

Rép: p.6

3_ Nommez les trois types de technologie utilisés principalement dans la conception de prototype. Quelles sont leurs particularités?

Rép: p.8

4_ Pourquoi est-il si important de bien connaître l'utilisateur?

Rép: p.9

5_ Nommez les deux principales firmes responsables, en Amérique du Nord, de la vérification des normes de sécurité du matériel électronique.

Rép: p.10

6_ Qu'est-ce que le "Crosstalking"?

Rép: p.13

7_ Nommez quelques procédés utilisés pour assurer une meilleure intégration électronique.

Rép: p.15-16

8_ Quels sont les trois principaux facteurs permettant d'établir le coût approximatif d'un prototype?

Rép: p.16

9_ Quelles sont les qualités que l'on doit rechercher à l'intérieur d'un logiciel de dessin électronique?

Rép: p.25

10_ Nommer deux systèmes couramment utilisés lors de l'expérimentation sur prototype.

Rép: p.29

11_ Quels sont les avantages et inconvénients du "Wire-wrap"?

Rép: p.29-30

12_ Qu'est-ce qu'un émulateur de "Rom"?

Rép: p.32

13_ Qu'est-ce que le "Netlist" et quelles informations contient-il?

Rép: p.35-36

14_ Combien de types de logiciel existe-t-il pour créer le "Artwork"? Nommez-les.

Rép: p.36

15_ Nommez les deux facteurs qui déterminent directement le coût d'un circuit imprimé.

Rép: p.37

16_ A quoi sert le "Burnin test"?

Rép: p.41

Les Circuits Imprimés.

17_ Qu'est-ce qu'un circuit imprimé?

Rép: p.49

18_ Nommez les différents types de circuit imprimé rigide.

Rép: p.51

19_ Quelles sont les sciences fondamentales que l'étudiant retrouve dans la fabrication des circuits imprimés?

Rép: p.53

20_ Quelle est la plus grande qualité du circuit imprimé qui favorise l'apprentissage de l'étudiant?

Rép: p.52

21_ Nommez les avantages du film photosensible par rapport au liquide.

Rép: p.59

22_ Doit-on utiliser des masques positifs ou négatifs, dans les systèmes de fabrication permettant la métallisation des trous?

Rép: p.59

23_ Nommer les facteurs qui permettent de réaliser une exposition de bonne qualité.

Rép: p.60

24_ Quels sont les produits chimiques les plus couramment utilisés dans le processus de gravure du cuivre?

Rép: p.63-64

25_ Qu'est-ce que le problème de gravure latérale?

Rép: p.65

26_ Enumérez les différentes phases que l'on doit respecter dans la fabrication d'un circuit imprimé avec métallisation des trous.

Rép: p.70

27_ Quel genre d'emplacement est nécessaire pour construire un laboratoire de fabrication de circuits imprimés?

Rép: p.75-76-77

28_ Quels soins doit-on apporter au circuit avant le plaquage?

Rép: p.80

29_ Comment protégerons-nous le cuivre que l'on veut garder sur la plaque?

Rép: p.91

30_ Quelle est l'utilité du "Solder mask"?

Rép: p.93

31_ Pourquoi faut-il ajouter certains produits chimiques à nos solutions au début de chaque session?

Rép: p.99

32_ Y a t-il des étapes auxquelles on doit accorder une attention plus particulière lors du plaquage?

Rép: p.106-107-108

33_ Que doit-on faire pour plaquer un connecteur avec de l'or?

Rép: p.111-112-113